



La baisse des coûts des tunnels. Mesures, causes et conséquences

Chi Zhang

► To cite this version:

Chi Zhang. La baisse des coûts des tunnels. Mesures, causes et conséquences. Économies et finances. Ecole nationale des ponts et chaussées - ENPC PARIS / MARNE LA VALLEE, 1994. Français. <pastel-00574135>

HAL Id: pastel-00574135

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00574135>

Submitted on 7 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

X

**ECOLE NATIONALE DES PONTS ET
CHAUSSEES**

**DOCTORAT DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET
CHAUSSEES**

TRANSPORT

ZHANG Chi

LA BAISSSE DES COUTS DES TUNNELS
Mesures, causes et conséquences

Date de soutenance: 10 Juin 1994

Composition du jury

M.Rémy PRUD'HOMME
M.Michel SAVY
M.Michel FRYBOURG
M.Jean Paul GODARD
M.Francis Luc PERRET
M.Bernard LABBE

RESUME

L'objectif de cette thèse est de tenter de chercher la loi, de trouver les facteurs déterminants des coûts des tunnels de métros, de les expliquer, de construire des modèles de prévision d'ordres de grandeur des coûts.

Cette étude est basée essentiellement sur la base de données établie en 1990 par le groupe de travail N°15 de l'Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES) concernant les coûts des infrastructures des métros français. La base des données utilisées dans cette étude comporte les principales opérations françaises réalisées de 1975 à 1990 (90 observations qui représentent environ 61 000 mètres au total). La recherche porte uniquement sur les coûts des tunnels entre les stations, rapporté au mètre linéaire d'ouvrage à 2 voies. Les méthodes statistiques utilisées sont notamment les régressions linaires ou multiples.

L'étude a permis de connaître le coût global, le coût hors équipements et le coût des équipements des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain, en tranchée couverte ainsi que sa composition, sa ventilation en pourcentage. L'analyse des facteurs quantitatifs et qualitatifs par des méthodes économétriques a permis de comprendre la complexité du problème des coûts, les facteurs déterminants des coûts et de construire des modèles pour la prévision du coût de grandeur. Cette étude a mise en évidence à une tendance d'évolution des coûts en Francs constants des tunnels de métros français qui est de l'ordre de -3,5 % par an en moyenne pendant la période 1975-1990, soit environ -50 % au total. La recherche a montré que les évolutions constatées résultent des efforts conjugués des ingénieurs d'étude, des expériences et des progrès techniques (l'emploi de tunnelier, la réduction du volume de structure en béton etc.). Les conséquences de l'évolution des coûts pour les autorités publiques et les entreprises ainsi que les tendances du marché des travaux souterrains ont été également analysées.

ABSTRACT

The purpose of this work is to attempt to look for the lows, to find determinating factors of subway tunnel costs, to explain them, to construct prevision models of costs.

This study is essentially based upon data established in 1990 by the work group N°15 of the French Association of Underground Engineering concerning the cost of French subways. This data base contains the principals french operations built from 1975 to 1990 (90 observations which represent a total of 61 000 meters). The research touches uniquely upon tunnel cost between stations, added to the linear meter of a tunnel with 2 lines. Statistical methods used in the work are notably linear or multiple regressions.

This research has permitted to know the total cost, with or without the equipment for urban and regional subway tunnels executed underground and trench covered, as well as its composition, its distribution of percentage. Quantitative and qualitative analysis of factors by econometric method have permitted to comprehend the complexity of the cost probleme, the determinating factors of cost, and to construct models for prevision cost. This study gave evidence of a tendency of evolution in the cost of french subway tunnels, which is a decrease by an average of -3,5% a year during the periode 1975-1990. This study showed that the noted evolution results from the joint efforts of research engineers, experiments and technical progress (the use of tunneling, the reduction of concrete structure volume, etc.). Consequences of cost evolution for public authorities and for corporations, as well as the market tendency underground structures are analysed.

REMERCIEMENTS

Durant plus de trois années de travail, de nombreuses personnes ont contribué à la réalisation de ce mémoire de thèse. Je tiens à exprimer tous mes chaleureux remerciements pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée. Tout d'abord:

M. Rémy PRUD'HOMME qui a dirigé ma thèse, pour ses orientations, ses critiques et sa patience, pour l'accueil chaleureux de son l'équipe de L'OEIL (l'Observatoire Economiques et Institutions Locales) de l'Université Paris XII, sans oublier M. Richard DARBERA, par son orientation et ses aides précieuses.

M. Michel SAVY pour son encouragement, ses orientations et son encadrement à l'Ecole Nationale des Ponts Chaussées (ENPC).

M. Pierre VELTZ Directeur et son équipe de Laboratoires Techniques, Territoires et Sociétés (LATTS) de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pour leur accueil chaleureux.

M. Jean François BOUGARD, Vice-Président de l'Association Internationale des Travaux Souterrains (AITES), directeur du Département des Infrastructures et Aménagements (ITA) de la Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP) et M. Henri DAVID, responsable de l'Unité Ingénierie des Infrastructures du ITA, qui m'ont ouvert les portes de la RATP.

M. Jean Paul GODARD, responsable du Management des Projets de ITA de la RATP, animateur du groupe N°15: "Coûts et avantages des travaux souterrains" de l'AFTES, qui m'a introduit dans ce groupe, et dans le service Management des projets de la RATP. Grâce à lui, j'ai eu accès à des

échantillons d'enquêtes réalisées par le groupe N°15 de l'AFTES. Sans ces données, je n'aurais pu aboutir aux résultats actuels de cette thèse. De plus, je le remercie sincèrement pour son orientation et son amitié.

M. François BARRIE, responsable de la cellule "Coûts" de la RATP, membre du groupe N°15 de l'AFTES, pour ses bases de données bien préparées, pour sa patience, son conseil et sa gentillesse.

M. Bernard LABBE, spécialiste de statistiques, pour son orientation dans la méthode statistique, pour ses corrections et ses conseils.

Je voudrais adresser mes remerciements à M. SIMONY, Directeur général adjoint de la SOFRETU et Mme Marie-Paul DEVAQUET du Ministère de Transports, qui par leurs efforts m'ont aidé à terminer ma thèse.

Je voudrais aussi remercier particulièrement Mme Anne-Marie COLLIN, M.Gérard COLLIN, Juriste et Ingénieur de la RATP et leur famille qui par leurs actes quotidiens m'ont aidé ainsi que ma famille durant tous nos séjours en France et M.G.COLLIN qui a corrigé mon expression française.

Je remercie tous ceux que je n'ai pu cités ici, mais qui ont contribué à la réalisation de cette étude.

En fin, je remercie avec toute ma gratitude la Société Nationale des Etudes et de Consultation des Métros de Chine qui m'a accordé le temps de mener cette recherche sans oublier mon épouse et ma fille, pour leur courage, leur compréhension et leur amour.

SOMMAIRE

CHAPITRE I. INTRODUCTION	16
I.1. L'importance des tunnels	16
I.2. La méconnaissance des coûts	19
I.3. L'intérêt des études des coûts	20
I.4. Les études antérieures	21
I.5. Les techniques de construction des tunnels	23
I.5.1. Les tunnels réalisés en tranchée couverte	23
I.5.2. Les tunnels réalisés en souterrain	27
I.6. La présentation de l'étude	35
CHAPITRE II. LA METHODOLOGIE DE L'ETUDE	39
II.1. L'enquête de l'AFTES	39
II.2. Les observations	40
II.3. Les méthodes de traitement de données	43
II.4. Conclusion	45
CHAPITRE III. L'EVOLUTION DES COUTS DES TUNNELS DE METROS URBAINS EXECUTES EN SOUTERRAIN	46
III.1. L'état des coûts de tunnels	46
III.1.1. Le coût total	46
III.1.2. Le contenu du coût	47
III.1.3. La répartition des coûts moyens en %	48
III.2. L'évolution des coûts	49
III.2.1. L'évolution des coûts	49
III.2.2. L'évolution des coûts hors équipements	51
III.3. L'analyse des facteurs	52
III.3.1. L'analyse des facteurs pris isolément	53
III.3.2. L'analyse par la régression multiple	58
III.4. Conclusion	63

CHAPITRE IV: L'EVOLUTION DES COUTS DES TUNNELS DE METROS URBAINS EXECUTES EN TRANCHEE COUVERTE	64
IV.1. L'état des coûts de tunnels	64
IV.1.1. Le coût total	64
IV.1.2. Le contenu du coût total	65
IV.1.3. La répartition des coûts moyens en %	65
IV.2. L'évolution des coûts	67
IV.2.1. L'évolution des coûts	67
IV.2.2. L'évolution des coûts hors équipements	68
IV.3: L'analyse des facteurs	69
IV.3.1. L'analyse des facteurs pris isolément	70
IV.3.2. L'analyse par la régression multiple	74
IV.4. Conclusion	77
CHAPITRE V. L'EVOLUTION DES COUTS DES TUNNELS DE METRO REGIONAL EXECUTES EN SOUTERRAIN	79
V.1. L'état des coûts	79
V.1.1. Le coût total et son contenu	79
V.1.2. La répartition des coûts moyens en %	81
V.1.3. L'évolution des coûts	81
V.1.4. Les coûts hors équipements	83
V.2. L'analyse des facteurs	84
V.2.1. L'analyse des facteurs pris isolément	84
V.2.2. L'analyse par la régression multiple	89
V.3. Conclusion	92
CHAPITRE VI. L'ANALYSE DE L'ENSEMBLE DE COUTS DES TUNNELS	93
VI.1. La présentation des facteurs	93
VI.2. L'analyse des facteurs pris isolément	96
VI.3. L'analyse de l'ensemble des coûts de tunnels réalisés en souterrain	98
VI.3.1. L'analyse avec des variables diverses	98
VI.3.2. L'étude par niveaux de technicité	101
VI.3.3. L'étude des cas	106
VI.4. L'analyse de l'ensemble de 89 observations	108

VI.5. Conclusion	112
CHAPITRE VII. L'EVOLUTION DES COUTS DES EQUIPEMENTS	114
VII.1. L'état et l'évolution des coûts	114
VII.2. L'analyse des facteurs	116
VII.3. Conclusion	117
CHAPITRE VIII. LES CAUSES DE L'EVOLUTION DES COUTS	119
VIII.1. Les causes sans influence	119
VIII.2. Les causes ayant une influence	123
VIII.2.1. La diminution du volume de structure en béton	123
VIII.2.2. Les progrès techniques	126
VIII.2.3. Les expériences	128
VIII 3: Conclusion	130
CHAPITRE IX. LES CONSEQUENCES DE L'EVOLUTION DES COUTS	132
IX.1. Les travaux souterrains - un grand marché	132
IX.2. Les conséquences pour les autorités et privés	134
IX.3. Les risques possibles	137
IX.4. Conclusion	137
CHAPITRE X. LES CONCLUSIONS GENERALES	140
X.1. La situation des coûts des tunnels	140
X.2. L'évolution des coûts et les facteurs déterminants	143
X.3. Les causes et les conséquences de l'évolution	154
X.4. Les remarques et les perspectives	157
LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	160
LES ANNEXES	165

LISTE DES FIGURES

Fig.I.1 - Evolution des investissements dans les travaux souterrains réalisés en métropole de France et son % par rapport au total des investissements de travaux publics	17
Fig.I.2 - Tunnels exécutés en tranchée couverte (à ciel ouvert en utilisant des palplanches)	24
Fig.I.3 - Tunnels exécutés en souterrain (de méthode classique à moderne)	31
Fig.I.4 - Perforatrice Beaumont construite en 1882 par les français	34
Fig II.1 - Distribution des coûts de tunnels hors équipements selon le mode d'exécution, la longueur réalisée et le type de réseaux	41
Fig II.2 - Distribution des coûts de tunnels hors équipements selon le mode d'exécution et la longueur réalisée	42
Fig. III.1 - Distribution du coût total des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain par période	47
Fig III.2 - Répartition des coûts moyens en % selon les postes de dépense des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain	49
Fig III.3 - Évolution du coût total, des coûts hors équipements et des équipements des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain	50
Fig. III.4 - Évolution des coûts hors équipements en moyenne pondérée selon les postes de dépenses	51
Fig .III.5 - Évolution des coûts hors équipements des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain	54
Fig. III.6 - Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain en fonction de longueur réalisée	55
Fig. III.7 - Coût hors équipements des tunnels de métros exécutés en souterrain (m3/ml) en fonction du volume de structure (m3)	56
Fig. III.8 - Classement des coûts en fonction des méthodes d'exécution	57
Fig. III.9 - Comparaison des coûts observés et des coûts calculés par l'équation de 6 variables	61

Fig. IV.1 - Distribution du coût total des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte par période	64
Fig IV.2 - Répartition des coûts moyens en % des postes de dépense des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte	66
Fig: IV.3 - Évolution du coût total, des coûts hors équipements et des équipements des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte	67
Fig. IV.4 - Évolution des coûts hors équipements en moyenne pondérée selon les postes de dépenses	68
Fig. IV.5 - Evolution des coûts hors équipements des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte	71
Fig. IV.6 - Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte en fonction de la longueur réalisée	72
Fig. IV.7 - Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte en fonction de l'ouverture	72
Fig. IV.8 - Coûts classés en fonction des méthodes de blindage périphérique	73
Fig .V.1 - Coût total des tunnels de métro régional exécutés en souterrain	79
Fig. V.2 - Répartition des coûts moyens en % selon les postes de dépense	81
Fig.V.3 - Evolution du coût total, des coûts des équipements et hors équipements	82
Fig. V.4 - Evolution des coûts hors équipements en moyens selon les postes de dépense	83
Fig. V.5 - Evolution des coûts hors équipements des tunnels de métro régional	85
Fig.V.6 - Coûts hors équipements en fonction de volume de structure en béton	86
Fig. V.7 - Coûts hors équipements en fonction de la section terrassée	87
Fig. V.8 - Coûts hors équipements classés en fonction de méthodes de traitement de terrain	88

Fig. V.9 - Coûts hors équipements classés en fonction de méthodes d'exécution	89
Fig. V.10- Comparaison des valeurs observées et calculées par le modèle de 3 variables	92
Fig. VI.1 - Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain en fonction de la section terrassée(m2)	96
Fig. VI.2 - Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain en fonction du volume de structure	97
Fig. VI.3 - Comparaison des coûts observés et calculés avec modèle de 3 variables	101
Fig. VI.4 - Tunnels exécutés en souterrain- Détermination des niveaux de technicité	102
Fig. VI.5 - Comparaison des coûts observés et calculés	105
Fig. VI.6 - Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains et régionaux- Distribution récapitulative- Situation de Météor et la ligne D	107
Fig. VII.1 - Coûts totaux des équipements par réseaux de transport	115
Fig. VII.2 - Evolution des coûts des équipements en moyenne par poste	116
Fig. VII.3 - Coûts des équipements en fonction de l'année	117
Fig. VIII.1 - Métros urbains-Tunnels exécutés en souterrain- Volume de structure en béton (m3) utilisé dans le temps	124
Fig. VIII.2 - Métros urbains - Tunnels exécutés en tranchée couverte - Volume de structure en béton (m3) utilisé dans le temps	124
Fig. VIII.3 - L'évolution des coûts de tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain en fonction de traitement de terrain	129
Fig. VIII.4 - L'évolution des coûts de tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain en fonction de terrassement	129
Fig. VIII.5 - Coûts des tunnels enterrés de métros urbains et régionaux par tranche de période	130

Fig. IX.1 - Récapitulation des conséquences de la baisse des coûts des tunnels	138
Fig.X.1 - Coût total dans le temps selon le mode d'exécution et le type de réseau	140
Fig.X.2 - Distribution des coûts moyens par postes de dépense - Selon le type du réseau et des méthodes d'exécution	142
Fig.X.3 - Evolution des coûts de tunnels - Tous les types de réseaux et les modes d'exécution	144

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1- Coûts des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain par postes de dépense	47
Tableau III.2 - Métros urbains - Exécution en souterrain Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives	60
Tableau IV.1 - Coûts des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte par postes de dépense	65
Tableau IV.2 - Métros urbains - Exécution en tranchée couverte Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives	76
Tableau V.1 - Coûts des tunnels de métro régional exécutés en souterrain par poste de dépense	80
Tableau V.2 - Métro régional - Exécution en souterrain Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives	81
Tableau VI.1 - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives	99
Tableau VI.2 - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain Coefficients des équations de régression expliquant le coût par les niveaux de technicité	104
Tableau.VI.3 - Comparaison des coûts prévus et des coûts calculés par les modèles	106
Tableau VI.4 - Ensemble des métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain et en tranchée couverte Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives	109
Tableau.VIII.1 - Evolution des salaires mensuels des ouvriers dans les travaux publics	121

Tableau.VIII.2 - Indices des prix des matières et des matériaux de construction	122
Tableau.IX.1 - Effectifs totaux et ouvriers par activité principale de travaux publics en France (1987 à 1992)	136
Tableau.X.1 - Coûts des tunnels par postes de dépense - Selon le type du réseau et des méthodes d'exécution	141
Tableau.X.2 - Coûts des tunnels selon le type du réseau et des méthodes d'exécution	143
Tableau X.3 - Ensemble des coûts des tunnels - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain et en tranchée couverte Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives	146
Tableau X.4 - Coûts des tunnels selon le type du réseau et des méthodes d'exécution Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives	151
Tableau X.5 - Facteurs significatifs pris en compte dans les analyses par régression multiple - Récapitulation	153
Tableau.X.6 - Comparaison de l'évolution des salaires d'ouvriers et les prix des matériaux (1975 à 1990)	155

LISTE DES ANNEXES

Annexe I.A - L'évolution des investissements dans les travaux publics en France

Annexe I. B - L'évolution d'activité dans les travaux publics en France

Annexe.II.A - Note méthodologique de l'enquête de l'AFTES

Annexe.II.B - Bordereaux de saisie des données

Annexe.II.C - Liste générale des opérations

Annexe II.D - Liste des chantiers visités

Annexe II.E - Liste des spécialistes contactés

Annexe.III.A - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en souterrain
- Répartition selon les postes de dépense

Annexe.III.B - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en souterrain
- Répartition en % selon les postes de dépense

Annexe.III.C - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en souterrain
- Coûts et % des postes de dépense important

Annexe.III.D - Tunnels de métros urbains - Exécutés en souterrain - Coûts
hors équipements et caractéristiques des travaux

Annexe.III.E - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en souterrain
- Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Annexe.III.F (a) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en
souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple
(20 variables explicatives, 32 observations)

Annexe.III.F (b) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en
souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple
(6 variables explicatives, 32 observations)

Annexe.III.F G - Ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et
régionaux - Exécutés en souterrain et en tranchée couverte - Résultats
d'analyse des facteurs par l'ELISEE

Annexe.IV.A - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en tranchée couverte - Répartition selon les postes de dépense

Annexe.IV.B - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en - tranchée couverte - Répartition en % selon les postes de dépense

Annexe.IV.C - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en - tranchée couverte - Coûts et % des postes de dépense important

Annexe.IV.D - Tunnels de métros urbains - Exécutés en tranchée couverte - Coûts hors équipements et caractéristiques des travaux

Annexe.IV.E - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en tranchée couverte - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Annexe.IV.F (a) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en tranchée couverte - Résultats d'analyse de la régression multiple (22 variables explicatives, 43 observations)

Annexe.IV.F (b) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en tranchée couverte - Résultats d'analyse de la régression multiple (8 variables explicatives, 43 observations)

Annexe.IV.F (c) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en tranchée couverte - Résultats d'analyse de la régression multiple (4 variables explicatives, 39 observations)

Annexe.V.A - Coûts des tunnels de métro régional - Exécutés en souterrain - Répartition des coûts et leur % selon les postes de dépense

Annexe.V.B - Coûts des tunnels de métro régional - Exécutés en souterrain - Coûts et % des postes de dépense important

Annexe.V.C - Tunnels de métro régional - Exécutés en souterrain - Coûts hors équipements et caractéristiques des travaux

Annexe.V.D - Coûts des tunnels de métro régional - Exécutés en souterrain - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Annexe.V.E (a) - Coûts des tunnels de métro régional - Exécutés en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple (12 variables explicatives, 14 observations)

Annexe.V.E (b) - Coûts des tunnels de métro régional - Exécutés en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple

(9 variables explicatives, 14 observations)

Annexe.V.E (c) - Coûts des tunnels de métro régional - Exécutés en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple
(3 variables explicatives, 13 observations)

Annexe.VI.A (a) - Ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux - Exécutés en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple
(22 variables explicatives, 45 observations)

Annexe.VI.A (b) - Ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux - Exécutés en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple
(9 variables explicatives, 45 observations)

Annexe.VI.A (c) - Ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux - Exécutés en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple
(3 variables explicatives, 43 observations)

Annexe.VI.B (a) - Ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux - Exécutés en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple (avec les niveaux de technicité)
(17 variables explicatives, 45 observations)

Annexe.VI.B (b) - Ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux - Exécutés en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple (avec les niveaux de technicité)
(5 variables explicatives, 45 observations)

Annexe.VI.B (c) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécutés en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple (avec les niveaux de technicité)
(5 variables explicatives, 29 observations)

Annexe.VI.C (a) - Ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux - Exécutés en souterrain et en tranchée couverte - Résultats d'analyse de la régression multiple
(34 variables explicatives, 89 observations)

Annexe.VI.C (b) - Ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux - Exécutés en souterrain et en tranchée couverte - Résultats d'analyse de la régression multiple
(13 variables explicatives, 89 observations)

Annexe.VI.D - 89 observations et ses variables explicatives

Annexe.VII.A - Ensemble des tunnels de métros urbains et régionaux -
Exécutés en souterrain et en tranchée couverte - Répartition des coûts des
équipements

Annexe.VII.B - Ensemble des tunnels de métros urbains et régionaux -
Exécutés en souterrain et en tranchée couverte - Coûts des équipements -
Résultats d'analyse des facteurs

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I.1. L'importance des tunnels

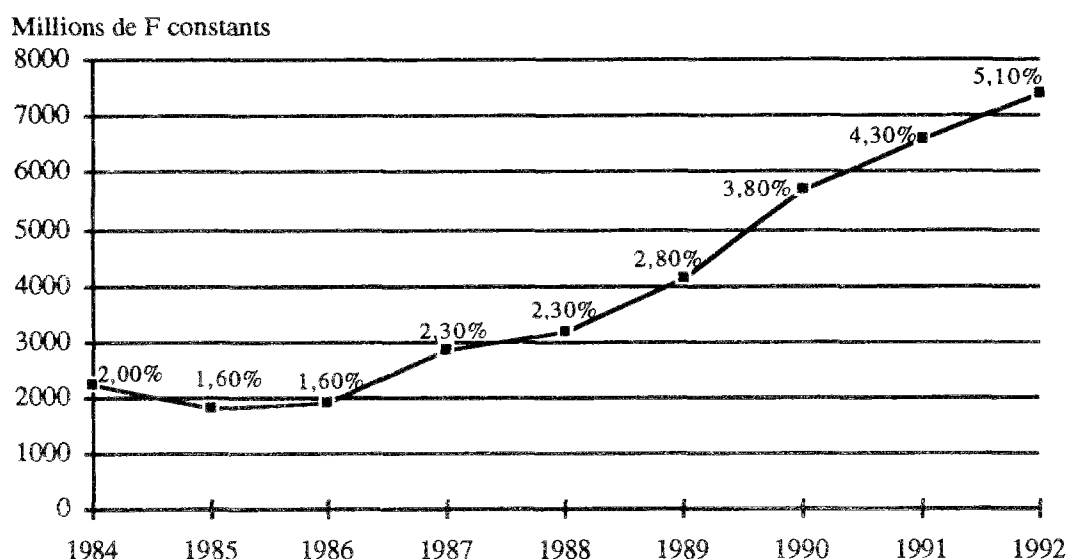
Un système de transport performant constitue un atout déterminant pour le développement économique. Il est particulièrement important en milieu urbain et y représente donc une des activités principales.

Actuellement dans le monde, 80 villes possèdent un réseau de métro, représentant environ 270 lignes pour un total de l'ordre de 4700 km avec 4300 stations. Si on compte le type RER ou quelques métros légers à grande capacité, on décompte environ 100 réseaux, 300 lignes représentant une longueur de l'ordre de 5300 km et comptant environ 5000 stations. Le rythme de développement des métros reste soutenu, puisque, au cours des dernières années, ont été construits en moyenne annuelle environ 160 km de lignes et 175 stations. Le marché des métros, matériel roulant compris, représente un chiffre d'affaire annuel moyen de plus de 100 milliards de francs, un chiffre qu'on peut pratiquement doubler si l'on tient compte des travaux de renouvellement et de modernisation des réseaux existants.

Parmi ces réseaux, on peut estimer que les deux tiers sont en souterrain. En effet, les travaux souterrains sont devenus un domaine de plus en plus important. Le montant des financements liés aux travaux souterrains en France a été multiplié par 4, passant de 1,9 milliard en 1986 à 7,4 milliard de francs en 1992. Au cours de la même période, sa part dans les travaux publics est passé de 1,6 % à 5,1 % (voir la figure I.1). Donc les travaux

souterrains ont connu une forte croissance et leur poids est de plus en plus lourd dans les travaux publics. Ils méritent une attention particulière.

Fig.I.1 - Evolution des investissements dans les travaux souterrains réalisés en métropole de France et son % par rapport au total des investissements de travaux publics



Source: Statistique annuelle de la Fédération Nationale des Travaux Publics de France 1992 (voir annexe I.A et B)

La figure I.1 montre la tendance du marché des travaux souterrains en France qui est en fort développement.

Ces chiffres reflètent le très fort accroissement des besoins de mobilité. En effet, la mobilité a une grande importance économique et sociale sans laquelle une ville ne peut pas fonctionner. Il est difficile à cet égard de ne pas évoquer le constat négatif dont font généralement l'objet les conditions de déplacement en sites urbains. Les villes françaises n'échappent bien sûr pas à ces difficultés, qui sont pour une grande part la cause de la dégradation des conditions de vie, en particulier dans les grandes métropoles.

Les inconvénients qui en résultent sont nombreux et bien connus: la pollution, les encombrements, les pertes de temps, pour ne citer que les

principaux, sont de plus en plus mal ressentis par les populations. De nombreuses études démontrent que les évolutions constatées ne peuvent raisonnablement pas se prolonger sans engendrer de graves conséquences sur les conditions de vie urbaine. Et il est désormais admis que c'est de l'amélioration des transports en commun que les villes doivent attendre la plus grande bouffée d'air.

L'importance des flux de déplacements à satisfaire, l'encombrement de l'espace urbain et la volonté de plus en plus affirmée de préserver et d'améliorer l'environnement conduisent dans la grande majorité des cas à recourir à des infrastructures souterraines. Or l'aménagement de telles infrastructures se heurte lui-même à l'importance de leur coût d'établissement par rapport à des infrastructures aériennes présentant théoriquement les mêmes fonctions, mais dont l'insertion s'avère le plus souvent très difficile, voire impossible, quand elle n'est pas purement et simplement rejetée par la plupart des parties concernées.

En site urbain, l'intérêt économique de la construction d'infrastructures de toutes natures en souterrain n'est pas à démontrer, d'autant plus que les besoins des investisseurs immobiliers et d'aménagement des villes poussent à la récupération du maximum d'emprises en surface. Parmi ces infrastructures, une importance particulière est à accorder aux transports publics en site propre (voies ferrées ou réservées à la circulation des autobus, autres engins guidés et systèmes de transports divers). Il est évident que le prix de revient de ces infrastructures est un élément fondamental de décision. C'est dire toute l'importance que revêt vis à vis de ce processus de décision, une bonne connaissance de ces coûts, surtout dans l'optique d'une comparaison entre les différents choix techniques.

I.2. La méconnaissance des coûts

Il n'existe pas de formule simple pour définir le coût des tunnels des infrastructures en zones urbaine et suburbaine. En effet, le coût de telles infrastructures est lié à de multiples facteurs que l'on peut répartir en trois rubriques:

- facteurs liés au système de transport proprement dit: capacité de la ligne, caractéristiques du matériel roulant et des équipements, espacement des stations;
- facteurs liés à l'environnement physique: particularités du site (topographie, climat), caractéristiques du tissu urbain, encombrement du sol et du sous-sol, caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de terrains traversés qui entraînent des méthodes d'exécution différentes. L'incidence des sujétions imprévues et des aléas techniques est considérable des travaux, surtout en souterrain.
- facteurs liés à la conjoncture et à l'environnement socio-économique.

C'est pourquoi toute évaluation d'un projet fondée sur la seule longueur des ouvrages et ne prenant pas en compte les éléments essentiels de leur définition physique et de leur environnement risque de conduire à des erreurs grossières d'appréciation.

En particulière pour chaque maître d'ouvrage, une connaissance statistiques des coûts est indispensable à la prévisions des dépenses. Il faut souligner toutl'intérêt des études de comparaison "avant - après" entre les hypothèses initiales et les résultats réels. Ces enseignements permettent non seulement de mieux cerner les prévisions pour une opération ultérieure, mais

contribue à renforcer la confiance des décideurs à l'égard des réalisateurs du projet.

L'objet de cette étude est de présenter la situation des coûts, de chercher des lois, de l'évolution des coûts, de trouver les facteurs déterminants des coûts, de les expliquer, de construire des modèles de prévision des ordres de grandeur des coûts.

Cette étude est une l'analyse à l'aide d'outils statistiques de plusieurs opérations relatives à des lignes nouvelles ou à des prolongements de lignes décomposées en ouvrages élémentaires et en postes de dépenses individualisés (Frais d'études et de surveillance, environnement, travaux de génie civil, second oeuvre et équipements).

I.3. L'intérêt des études des coûts

La recherche d'économie dans les tunnels des métros urbains et régionaux présente un intérêt particulier, parce que le tunnel est un ouvrage d'une longue vie et son coût est onéreux. De plus, les travaux souterrains constituent actuellement un grand marché et ont un avenir prometteur. Les ouvrages en souterrains de métros, chemin de fer, autoroute, parkings sont considérés comme les meilleures solutions pour la préservation de l'environnement et sont souvent inévitables.

Le transport urbain est une préoccupation majeure pour toutes les grandes villes du monde. Lorsque le trafic est supérieur à 20000 voyageurs par heure par sens, on choisit en général un système de transport en site propre intégral. Il pose des problèmes d'insertion. Le souterrain est donc souvent choisi comme solution. Le coût des infrastructures est déterminant pour le choix de la solution, puisqu'ils coûtent chers. Une bonne connaissance des coûts peut fournir des informations importantes pour la décision.

Ainsi les notions de sécurité, d'hygiène, de rapidité, d'impact sur l'environnement, sont autant d'éléments à retenir et qui traduits en termes économiques devraient être considérés dans l'examen comparé de la solution souterraine par rapport à la solution de transport en surface.

On espère, par cette étude, trouver un point de repère pour aider la décision, et éviter des erreurs d'appréciation

I.4. Les études antérieures

Dans le domaine des travaux souterrains, on trouve beaucoup d'études et de recherches sur les techniques, peu d'études sur les coûts. Bien sûr les études des coûts cas par cas ou à partir des structures ou des systèmes de transports ne manquent pas. Dans la recherche d'économie des coûts des travaux souterrains, il faut mentionner l'AFTES (Association Française des Travaux en Souterrain).

Crée en 1974, sous l'impulsion de l'AFTES et de la B.T.S (British Tunneling Society), l'AITES (Association Internationale pour les Travaux en Souterrain), compte aujourd'hui 38 pays membres, dont l'ex l'U.R.S.S. qui adhéra dès l'origine. Et dans chaque pays membre, l'A.I.T.E.S. dispose de délégués nationaux. Son rôle: la promotion de l'utilisation de l'espace souterrain. En informant les responsables, en se mettant à l'écoute de leurs problèmes, en les aidant dans la définition des politiques de transport.

L'A.F.T.E.S, au nombre des premières associations nationales créées suite à la recommandation de Washington en 1972 joue un rôle incitatif au sein de l'A.I.T.E.S. Sans oublier que le mode de fonctionnement de l'association internationale est calqué sur celui de l'association française.

Il entre dans la mission de l'AFTES de fournir aux maîtres d'ouvrages et décideurs des éléments d'appréciation concernant les coûts de telles infrastructures, ainsi qu'en ce qui concerne les avantages spécifiques, souvent difficilement quantifiables, des ouvrages souterrains. C'est la raison pour laquelle elle a créé en 1990 un groupe de travail dont le thème est "Coûts et avantages de la réalisation d'ouvrages souterrains" et a suscité la création, au sein de l'AITES, d'un groupe international sur le même sujet. Son but est d'élaborer des arguments pour les décideurs permettant d'aller au-delà de la seule prise en compte du prix, de voir à long terme.

C'est une tâche de longue haleine qui nécessite dans un premier temps l'analyse des coûts de construction et la détermination des avantages indirects des principaux types d'ouvrages en souterrain.

L'intérêt manifesté en 1981, lors des journées d'études de l'AFTES concernant "Economie des travaux souterrains" tenues à Nice, pour l'étude présentée par le groupe de travail N°10 de l'AFTES par M.Godard sur "Les coûts des infrastructures de transports ferroviaires en zones urbaine et suburbaine" a conduit à la suite le nouveau groupe de travail N° 15 à entreprendre une mise à jour de cette étude pour tenir compte des réalisations intervenues depuis cette date. L'objectif est, comme le précédent, de donner des points de repères et certains ordres de grandeur susceptibles de contribuer à la prévision de ces coûts.

Une étude statistique et économétrique reposant sur un grand nombre d'échantillons pendant dizaine d'années, en intégrant plusieurs facteurs est original. C'est pourquoi le groupe a mené une enquête en 1990 sur les coûts des infrastructures de transports ferroviaires en zone urbaine et suburbaine.

L'exploitation d'éléments statistiques d'une centaine d'ouvrages élémentaires en France pour une longueur totale d'équivalent deux voies de 63 kilomètres de tunnels permet de mieux connaître ce phénomène. Par des tentatives d'analyses statistiques, il est possible de mettre en évidence la composition des coûts des ouvrages souterrains et leur ventilation en pourcentage. Cette analyse éclaire les facteurs susceptibles d'avoir un effet sur les coûts et en particulier, les méthodes d'exécution, les contraintes externes, l'influence de la longueur des ouvrages élémentaires et l'évolution des coûts dans le temps.

I.5. Les techniques de constructions des tunnels

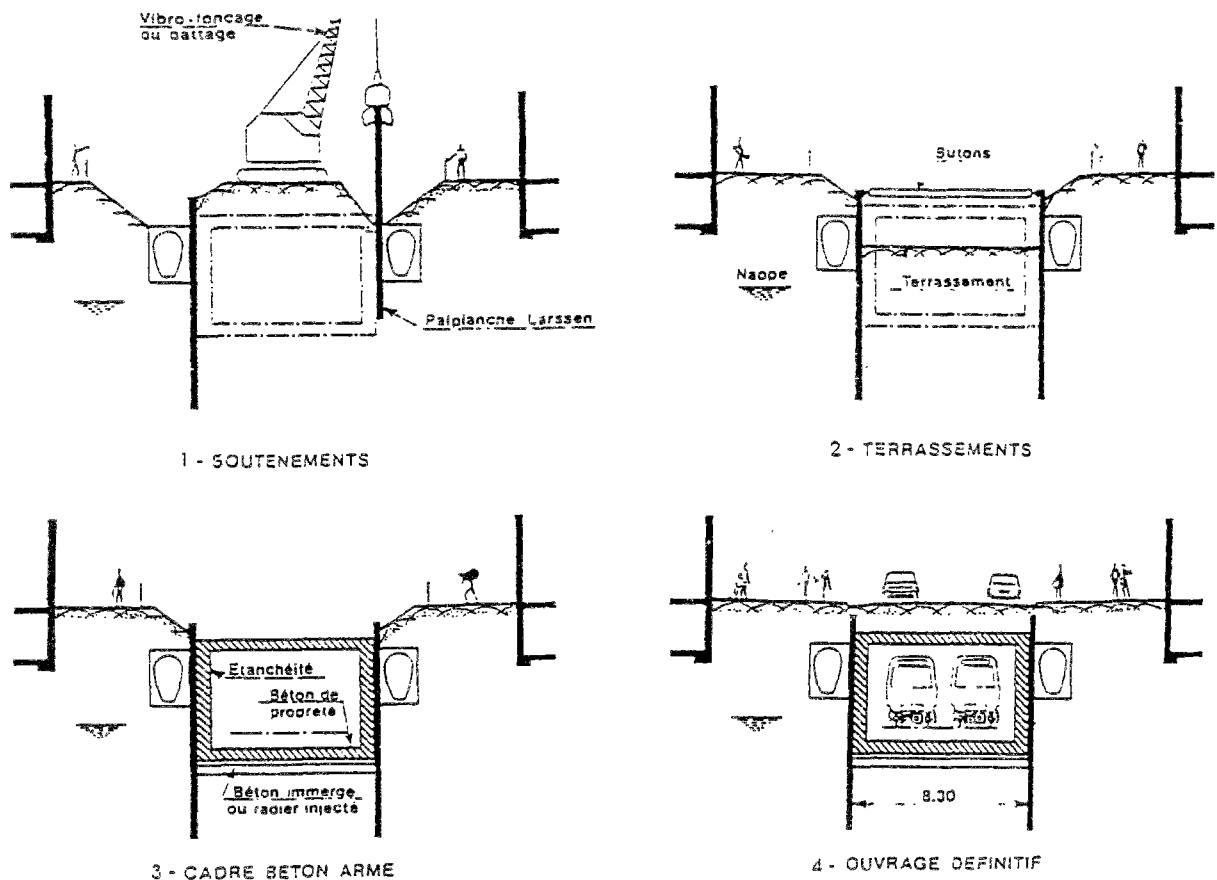
Il existe deux méthodes pour la construction de tunnel: en tranchée couverte (ciel ouvert) et en avancement souterrain. Ces deux méthodes sont complètement différentes, donc une présentation succincte des méthodes apparaît nécessaire et facilite la compréhension des chapitres qui suivent.

I.5.1- Les tunnels exécutés en tranchée couverte

Les tunnels exécutés en *tranchée couverte*, sont construits après creusement d'une fouille à *ciel ouvert*, ou d'une tranchée, talutée ou non, puis à exécuter un cadre en béton armé à ciel ouvert(fig I.2), enfin ils sont remblayés.

L'exécution à ciel ouvert implique un tracé sous les voiries existantes. Des travaux préliminaires de déviation de réseaux des services publics et concessionnaires sont réalisés avant le terrassement.

Fig.I.2 - Tunnels exécutés en tranchée couverte (à ciel ouvert en utilisant des palplanches)



Cette disposition concerne les réseaux parallèles au tracé. Les réseaux perpendiculaires sont soutenus au-dessus de la fouille.

Des platelages sont disposés au-dessus de la fouille pour rétablir les circulations, ceci pour gêner le moins possible les riverains ainsi que les automobilistes.

Des circulations parallèles sont déviées de part et d'autre de la fouille. Une méthode consiste à mettre en place le *soutènement* puis à bétonner la dalle de couverture du cadre sur le sol. La circulation en surface est rétablie après avoir remblayé au-dessus de cette dalle. L'excavation et le bétonnage du cadre sont réalisés en sous-oeuvre (la dalle portant sur les soutènements). Cette solution onéreuse est réservée au cas où le rétablissement de la voirie doit être fait le plus rapidement possible.

Dans le cas où une exécution en tranchée couverte (à ciel ouvert) est choisie. Une fois après la réalisation des travaux préliminaires de déviation de réseaux des services publics et concessionnaires, le problème essentiel qui se pose est celui du maintien des terres excavées. C'est ce qui distingue les différentes méthodes utilisées: fouilles talutées, fouilles cloutées, fouilles blindées, fouilles verticales avec utilisation de palplanches, de parois berlinoises, de parois moulées ou de parois préfabriquées.

Fouilles talutées

Le principe est de creuser une *fouille talutée*. Sois, l'exécution de radier et piédroit, puis la construction de dalle supérieure de tunnel, enfin le remblaiement et la rétablissement de circulation. C'est la méthode la plus simple qui ne peut le plus souvent être envisagée qu'en rase campagne.

Fouilles à parois cloutées

Elle consiste à clouter la *paroi* en y enfonçant au fur et à mesure que la fouille est creusée des barres d'acier de quelques mètres de longueur à l'aide de marteaux hydrauliques. Elles sont disposées selon un quadrillage horizontal-vertical, l'intervalle entre elles dépendant des caractéristiques du terrain. Celui-ci est ainsi renforcé sur une certaine profondeur et ces sortes

d'armatures, qui créent une véritable paroi armée, permettent de creuser pratiquement à la verticale.

Palplanches

Les *palplanches* sont des profilés métalliques qui sont enfoncées par vibrofonçage le long des parois des tunnels à construire. Après terrassement de la fouille au cours duquel les palplanches, maintenus par des butons, jouent le rôle de soutènement, les tunnels sont bétonnés. Le remblaiement permet ensuite le rétablissement de la circulation.

Parois berlinoises

Les *berlinoises* sont constituées de profilés métalliques espacés tous les 2,50m à 3m, introduits dans le sol avant terrassement.

Le blindage entre les profilés est assuré par des planches en bois ou béton armé ou par un béton projeté armé d'un treillis soudé.

Ce soutènement est stabilisé par des tirants ancrés dans le sol à l'arrière du mur ou bien par des butons (profilés métalliques) disposés au travers de la fouille. Ces deux dispositifs s'appuient directement sur les profilés verticaux. Ils peuvent également s'appuyer sur des liernes (profilés métalliques) disposées sur les rideaux parallèlement à l'axe longitudinal de la tranchée. Ces liernes répartissent les efforts appliqués sur les profilés verticaux aux tirants ou aux butons.

Les parois berlinoises présentent l'avantage de permettre une étanchéité extérieure de l'ouvrage. Cette méthode de construction est utilisée dans les terrains granulaires et cohérents.

Parois moulées-parois préfabriquées:

Le procédé consiste, dans son principe, à réaliser dans le sol avant toute excavation un mur vertical en béton d'une épaisseur de 50 à 80 cm, exceptionnellement 1,2 à 1,5 m, destiné à servir de mur de soutènement, d'élément porteur et d'écran d'étanchéité.

La méthode des *parois préfabriquées* dérive de la technique de la paroi moulée. Elle consiste à remplacer le béton in situ par des panneaux en béton armé préfabriqué.

La paroi préfabriquée assure en général une triple fonction du blindage de l'excavation, reprise des charges verticale apportées par la couverture, étanchéité en phase de construction et définitive.

Dans la zone urbanisée dense, la construction "à ciel ouvert" est souvent difficilement compatible avec l'utilisation de l'espace urbain pendant la durée des chantiers, voire totalement impossible, donc, la méthode d'exécution en souterrain s'impose.

I.5.2- Les tunnels exécutés en souterrain

Les tunnels exécutés en souterrain, sont réalisés par un creusement souterrain. On distingue la méthode d'exécution suivant les terrains durs ou rocheux et les terrains meubles

a) Méthodes d'exécution des tunnels en terrains durs ou rocheux

C'est dans ces types de terrains que la plupart des excavations souterraines étaient autrefois réalisées en raison de la stabilité que ce milieu garantissait et du fait qu'il n'était généralement pas nécessaire d'étayer les parois de manière autre que sommaire. Les deux principales familles de techniques de creusement dans les roches relèvent, l'une de l'utilisation de l'*explosif*, l'autre de l'emploi de *machines à forer*.

En ce qui concerne l'*explosif*, le principe consiste à perforer des trous de mine dans la paroi du front d'attaque, et de placer dans ces trous des cartouches d'explosifs, puis le sauta produisant un dégagement pour les abattages ultérieurs.

Pour éviter la chute accidentelle de blocs de roche et empêcher toute manifestation de la décompression, le soutènement des parois est nécessaire. Ce *soutènement* peut être réalisé grâce à la mise en place de *cintres métalliques* assemblés sur place et soigneusement calés contre le ciel de l'excavation. Des grillages peuvent être également déployés sur celui-ci entre les cintres afin de retenir les blocs risquant de se détacher et de tomber.

Mais il peut également être assuré par *boulonnage*, qui consiste à "accrocher" les parements aux couches supérieures, moins fragiles car moins affectées par les explosions, grâce au scellement de tiges métalliques dans le massif encaissant.

Autre procédée *soutènement* qui associe, soit les cintres métalliques, soit plus généralement le *boulonnage* : le *béton projeté*, encore appelé: *Nouvelle Méthode Autrichienne*. Il consiste à appliquer sur les parois du souterrain une couche de béton en le projetant à l'aide d'une lance à air comprimé.

A propos de *machines à forer*, il existe deux grandes catégories: les *machines à attaque ponctuelle* qui n'abattent qu'une partie de la section à la fois, et les *machines pleine section* qui creusent la totalité de la section en une seule fois.

Le type de *machine à attaque ponctuelle* le plus utilisé comporte une tête de forage équipée d'outils d'abattage et disposée à l'extrémité d'un bras mobile dans un plan vertical et dans un plan horizontal. Les déplacements du bras, qui est fixé sur un châssis automoteur, sont commandés par des vérins hydrauliques. Ils permettent à la tête de forage de balayer la section à abattre.

les *machines pleine section* encore appelées *tunneliers*, excavent en une seule fois la totalité de la section circulaire du tunnel. De types variés, les *tunneliers* comportent le plus souvent un *plateau circulaire* tournant autour d'un axe confondu avec celui de la galerie et portant des outils d'abattage. En arrière du plateau, les vérins de poussée qui assurent aussi son orientation dans les courbes. Une Machine Robbins a été utilisée sur les tunnels de métro régional Châtelet - Gare de Lyon - Nation.

b) Méthodes d'exécution des tunnels en terrain meuble

D'une manière générale, en terrain meuble (couches plastiques, graviers, sables, vases, etc....), le principal danger qu'entraîne le creusement d'un tunnel est un relâchement ou une relaxation des terrains le surmontant qui tend à combler l'excavation en cours. Ce phénomène, dénommé *décompression* se manifeste par un fléchissement des couches supérieures et des parois latérales.

Si ce phénomène, bien entendu amplifié en présence d'eau, n'est pas contrôlé, il peut s'avérer particulièrement dangereux pour le tunnel lui-

même ainsi que pour le personnel qui y travaille puisqu'il peut entraîner des éboulements localisés, voire un effondrement total.

De plus, cette décompression se répercute plus ou moins rapidement jusqu'en surface et s'y traduit par des affaissements appelés *tassements*.

En effet, l'objet de toutes les méthodes d'exécution en souterrain des tunnels en terrain meuble est, de lutter contre la décompression, d'assurer la sécurité au sens général avant toute considération sur les performances d'avancement.

Méthodes classiques:

La méthode des *galeries boisées* est la plus classique employée pour le percement des tunnels quelles que soient la cohésion des terrains, la profondeur de l'ouvrage et la hauteur de la nappe phréatique. Elle consiste à effectuer progressivement et par parties successives l'ouverture de l'excavation des ouvrages et le revêtement des différents éléments constitutifs du tunnel: voûte, piédroits et radier (Fig I.3)

Selon la manière de terrassement en pleine section ou par galerie etc., cette méthode classique appelé aussi Méthode anglaise (attaque à pleine section), Méthode allemande(trois galeries), Méthode belge (galerie de faîte).

Amélioration des méthodes

a) Amélioration des caractéristiques des terrains soit en consolidant, soit en l'étanchant par:

-*Traînage ou le rabattement de la nappe* par puits;

-*Congélation*, le principe de la congélation consiste à créer un abaissement de température autour de sondes (ou tubes réfrigérants) forées dans le sol.

On distingue les injections depuis la surface, appelé *Traitement depuis la surface*; les injections à partir du souterrain en construction, appelé *Traitement à l'avancement*; les injections auréolaires à partir une galerie pilote préalablement exécutée, dit *Traitement auréolaire à partir d'une galerie*.

b) Amélioration des procédés

De nombreux améliorations ont été entreprises au terrassement et au gros oeuvre des tunnels pour les méthodes classiques grâce à l'emploi de l'acier et du béton. Par exemple, pour l'exécution des galeries et des abattages pour voûtes, les bois en grumes qui constituaient autrefois les étais et les poteaux ont été remplacés par des profilés métalliques.

En ce qui concerne le *revêtement*, de grands progrès ont également été accomplis. Son rôle essentiel est d'assurer le soutènement définitif des terrains. Il se substitue au soutènement provisoire mis en place immédiatement après l'excavation ou, dans le cas d'un soutènement métallique, il le renforce sans qu'il soit besoin d'ôter celui-ci. Traditionnellement en maçonnerie, ce qui constitue un procédé long et onéreux, il est maintenant réalisé en béton coulé sur place avec des coffrages. Le revêtement peut également être *préfabriqué*. Il est alors composé d'éléments appelés *voussoirs*, dont l'assemblage constitue un anneau.

Le *tunnelier* est une machine multifonctions qui doit assurer une cavité sans nuire au milieu environnant. Elle assure l'abattage, le soutènement provisoire des parois latérales et du front de taille, le marinage et la pose du revêtement définitif. Dans les terrains meubles et aquifères, le tunnelier est

composé d'un bouclier (virole métallique), résistant à la pression des terres qui sert de support aux principaux organes:

- Les organes d'abattage ou outils de coupe, complétés éventuellement d'accessoires: trousse coupante, blindage frontal...logés dans la chambre d'abattage;
- Les organes de poussée et de pilotage: bloc moteur vérins;
- Le convoyeur évacuant les déblais;
- Le système de contrôle et de mesure;
- Les organes de pose du revêtement, érecteurs, convoyeurs de voussoirs.

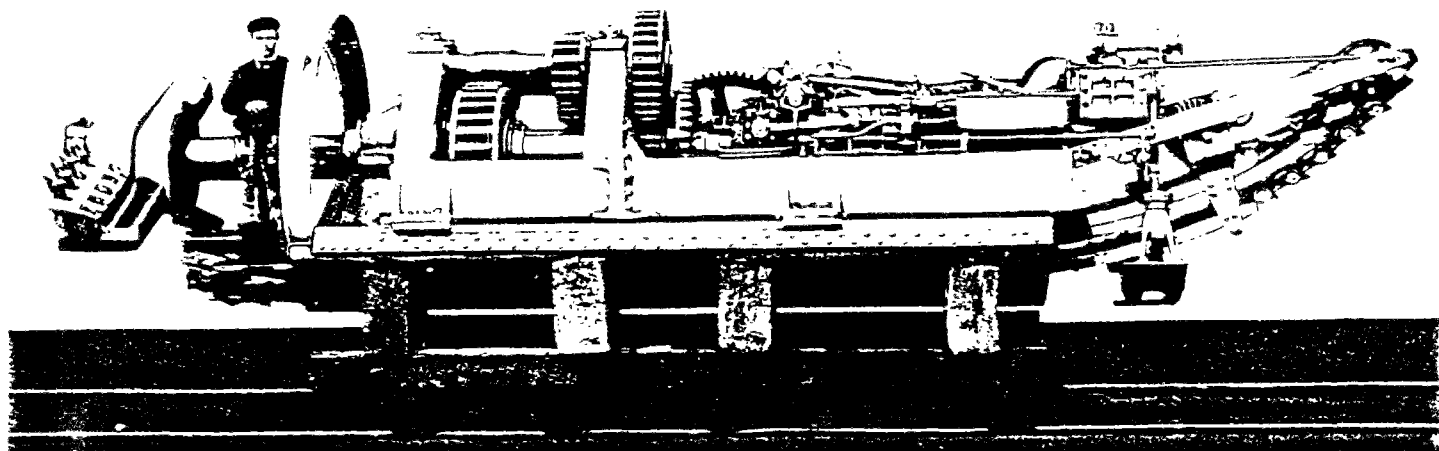
L'utilisation des tunneliers pour réaliser des ouvrages souterrains est de plus en plus fréquente. Les maîtres d'oeuvre et les entreprises ont bien compris l'intérêt de cette technique pour assurer la sécurité des chantiers et de l'environnement, pour réduire les délais et les coûts de réalisation.

La méthode d'exécution en souterrain permet de s'affranchir:

- des déviations de circulation automobile;
- des déviations des réseaux des services publics;
- des nuisances de travaux vis-à-vis des riverains (bruit, poussières...);
- de l'obligation de concevoir un tracé sous les voiries, moyennant une étude particulière pour les passages sous les fondations des bâtiments;
- de la recherche archéologique.

Historiquement, le premier ancêtre des boucliers a été utilisé entre 1825 et 1843 par les Anglais pour creuser une galerie piétonne sous la Tamise. Il s'agissait d'un bouclier manuel ouvert, avec un soutènement en bois pour le front de taille et avancement au moyen de vérins à vis s'appuyant sur le revêtement en briques.

Fig.I.4 - Perforatrice Beaumont construite en 1882 par les français



Perforatrice Beaumont construite en 1882 par la Société de Construction des Batignolles pour le percement du tunnel sous la Manche, \varnothing 2,13 m à SANGATTE (France).

Beaumont tunneler built in 1882 by the Société de Construction des Batignolles to drill the SANGATTE gallery, 2.13 m diameter for the Channel tunnel (France).

La technique a ensuite évolué progressivement, avec l'utilisation des vérins hydrauliques, des boucliers mécanisés etc. Ce n'est qu'en 1960 qu'est apparu le premier bouclier à boue en Grande Bretagne, et en 1965 au Japon. Le bouclier à pression de terre, quant à lui, est apparu en 1974 au Japon. En France, on a utilisé le premier bouclier à boues en 1984 seulement, pour le métro de Lyon. La France cherche à combler son retard en encourageant les entreprises et en développant un projet national de recherches "Tunnel 85-90". Grâce à ces effets, à nos jours, 60 tunnels ont été réalisés par les tunneliers en France.

Quant on parle des progrès techniques dans les travaux souterrains, on n'oublie pas les efforts de l'OCDE, de l'AITES et de l'AFTES. Sous l'impulsion de l'OCDE et du gouvernement Français, l'AFTES est chargée de promouvoir les travaux souterrains et d'en faire progresser les techniques. Elle joue pour sa part un rôle actif en continuant notamment à poursuivre des recherches à l'initiative de son comité technique et de ses différents groupes de travail.

1.6. La présentation de l'étude

Le sujet de cette thèse: *évolution du coût des tunnels* est né grâce au professeur Rémy Prud'homme. Je me souviens bien notre première rencontre: après qu'il m'ait posé quelques questions il m'a proposé ce sujet en formant l'hypothèse que la baisse du coût des tunnels existe, que ce soit des tunnels ferroviaires ou routiers, toutes choses égales par ailleurs, puisqu'il a constaté que le coût de la construction des ponts a beaucoup baissé. Si ce phénomène existait dans les tunnels, ce serait très intéressant, parce que le tunnel ne change pas après la construction (sauf entretien ou réaménagement), il coûte cher et il est irréversible. Comme je travaille en Chine dans le secteur de transport urbain (métro), j'ai commencé par la recherche du coût des tunnels de métros.

Après un moment passé à rechercher des informations, j'ai trouvé que le groupe de recherche N° 15 de l'AFTES avait fait une enquête sur ce sujet. Ce groupe est animé par M.Jean-Paul Godard, responsable du groupe de soutien "Management des projets" du Département des Infrastructures et Aménagements de la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens). A la suite des entretiens entre M.J.P Godard, mon directeur de thèse M. R.Prud'homme, mon professeur Michel Savy et moi même, M.J.P.Godard a eu l'audace de me donner accès à ces données pour ma recherche. J'ai donc eu la chance de travailler avec ce groupe pour étudier les coûts des infrastructures, notamment les coûts de tunnels.

Cette étude est ainsi bien fondée, grâce aux échantillons (appelé aussi *observations*) des travaux de l'AFTES. Les résultats de cette thèse

constituent naturellement une partie des résultats du groupe et alimentent aussi la thèse.

Cette étude est composée de 10 chapitres. Le présente introduction constitue le première chapitre.

Le deuxième chapitre présente la méthodologie. on y trouve l'enquête de l'AFTES, le classements des échantillons.

Le troisième chapitre étudie l'évolution des coûts des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain. Le quatrième chapitre s'occupe de l'évolution des coûts des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte. Le cinquième chapitre traite l'évolution des coûts des tunnels de métro régional exécutés en souterrain. La méthode d'analyse pour ces 3 chapitres est commune, constituant 3 étapes:

- Une situation des coûts est présentée en premier lieu. La connaissance de l'état des coûts, du contenu et de la répartition des coûts est une préoccupation des entreprises. Elle constitue aussi un des objets importants de l'enquête effectué par l'AFTES: La situation des coûts est déjà un résultat important qui oriente la suite de la recherche.

- Une analyse de l'évolution des coûts est la seconde étape. D'abord, on présente l'évolution du coût total, du coût hors équipement et du coût des équipements, ensuite, l'évolution du coût hors équipement est analysée en détail parce qu'il représente la majeure partie du coût total.

- L'étude des facteurs des coûts constitue la troisième étape. C'est l'approfondissement de la recherche de l'évolution du coût, mais, le temps y est considéré comme un facteur. Le coût est étudié dans un contexte compliqué. Les facteurs quantitatifs et qualitatifs conditionnant les coûts sont

analysés isolément ou dans leur ensemble par des méthodes simples et complexes. A l'issue de ces multiples analyses, des résultats encourageants sont dégagés, notamment les facteurs déterminants des coûts, éléments de la cause de l'évolution des coûts et les modèles de prévision de l'ordre de grandeur.

Le sixième chapitre est un complément des chapitres III, IV et V. Il analyse d'abord les coûts des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrains dans leur ensemble, parce que les méthodes d'exécution en souterrain sont identiques, tandis que dans les chapitres précédents, les coûts sont analysés séparément selon le type de réseau. Dans ce chapitre, un classement des facteurs qualitatifs en 3 niveaux de technicité est présenté. L'analyse dans leur ensemble et l'introduction des niveaux de technicité améliorent des résultats.

Ensuite, une analyse de l'ensemble de 89 observations (tunnels exécutés en souterrain et en tranchée couverte, de métros urbains et régionaux tout confondu) a été faite. L'avantage de cette exercice est d'augmenter le nombre d'observations, mais l'interprétation des résultats est délicate, puisque les méthodes d'exécution en souterrain et les méthodes en tranchée couverte ne sont pas comparables.

Le septième chapitre examine le coût des équipements pour tous les tunnels, quelque soit leur méthode d'exécution. puisque le coût des équipements représente une faible partie du coût total et qu'ils ne dépendent pas des méthodes de construction des tunnels.

Le huitième chapitre cherche les causes de l'évolution des coûts. Il n'est pas aisé d'apprécier les causes. L'étude commence par l'élimination des facteurs sans influences sur la baisse des coûts. Ensuite, l'étude dégage les principales

causes à partir des statistiques officielles (INSEE) de l'évolution des indices de prix des matériaux et de salaires, des visites de chantiers et des entretiens avec des spécialistes.

Le neuvième chapitre prévoit les conséquences de l'évolution des coûts. Cela est encore plus difficile. Les idées qui y sont présentées sont le résultat de réflexions personnelles.

Le dernier chapitre est la conclusion générale dans lequel, les principaux résultats et les conclusions de chaque chapitre sont repris d'une manière synthétique. On y trouve aussi des perspectives et des questions qui restent à étudier.

Les données de base, les feuilles de calcul et les informations diverses étroitement liées à cette thèse sont renvoyées aux annexes qui constituent une partie inséparable de la présente recherche.

CHAPITRE II

LA MÉTHODOLOGIE DE L'ETUDE

II.1- L'enquête de l'AFTES

L'Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES) organise un groupe de travail n° 15 sur les "Coûts et avantages de la réalisation d'ouvrages en souterrain". Un de ses thèmes de recherche est intitulé "Etude des coûts des infrastructures de transports ferroviaires en zone urbaine et suburbaine". Dans cet objectif, une enquête a été faite par l'AFTES au mois de mars 1990 auprès des sociétés françaises des métros de Paris, de Lyon, de Marseille et de Lille.

Les bordereaux de saisie (voir annexes II A et B) des données ont été distribués aux différentes sociétés des métros, qui ont fourni les coûts à une date de référence proche de la réalisation de l'opération. Les coûts sont saisis en deux niveaux: Coûts des "ouvrages" et Coûts des "opérations":

Coûts des ouvrages

On distingue deux grandes classes d'ouvrages sur l'enquête: les "ouvrages en ligne" et les stations (ou gares).

Ce qu'on appelle "ouvrage en ligne" est un tronçon de ligne à deux voies présentant des caractéristiques homogènes au plan:

- du type d'infrastructure (tunnel foré, tranchée couverte, plateforme en déblai, au sol ou remblai, viaduc...);
- du niveau moyen d'implantation (par convention: niveau des voies) par rapport au niveau du sol;
- de la configuration géométrique (section transversale);

- des caractéristiques de l'environnement géologique et hydrogéologique;
- des caractéristiques de l'urbanisation;
- des méthodes d'exécution.

Dans la présente recherche, les ouvrages en ligne appelé "tunnels", parce qu'elle n'étudie pas les coûts des stations et viaducs.

Coûts des opérations

Une opération est un tronçon de ligne exécuté pendant un intervalle de temps donné. L'étude ne prend donc pas en compte les équipements ou aménagements que sont le matériel roulant, les systèmes embarqués, les zones de garages, les ateliers du matériel roulant, les postes de commande centralisée, les complexes de maintenance, les complexes socio-administratifs, les gares routières ou points d'échanges conjugués aux gares ou stations et les ouvrages de raccordement.

La présente recherche examine uniquement les coûts des ouvrages en ligne, c'est à dire les tunnels entre les stations, exécutés en souterrain et en tranchée couverte, rapportés au mètre linéaire d'ouvrage à 2 voies.

Cette étude est basée essentiellement sur la base de données établie en 1990 par le groupe de travail N°15 de l'AFTES concernant les coûts des métros français. Les données ont été confirmées et complétées au fur et à mesure de la recherche.

II.2 - Les observations

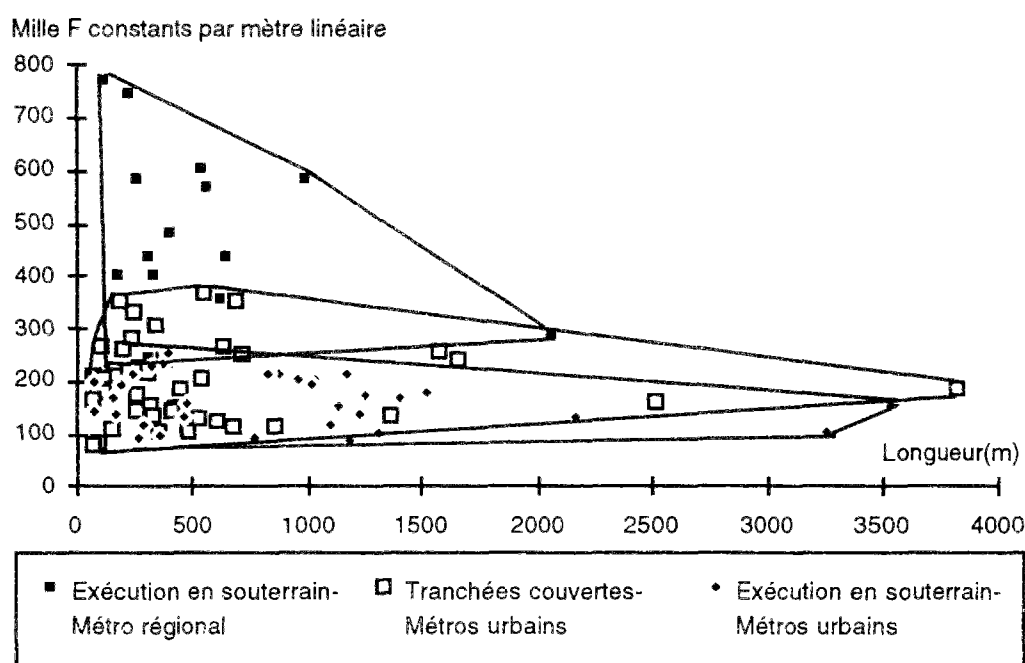
Dans l'enquête de l'AFTES, il existe des centaines d'observations concernant les tunnels, chaque observation comprend 6 bordereaux de saisie (voir annexes II A et B). De ce fait, les données utilisées dans la présente étude proviennent environ de 600 feuilles d'information. Puis, à l'issue des discussions et avec l'accord du groupe de travail N°15 de l'AFTES, les

observations trop petites sont éliminées (ouvrages de longueur inférieure à 60 m, traversée de la Seine...). Les 89 observations qui représentent 61 000 mètres au total environ, constituent la base de l'étude. Parmi ces observations obtenues, on a constaté des données imprécises de province, ces données ont été confirmées sur place. La base des données utilisées comprend les principales opérations françaises réalisées de 1975 à 1990. Ce sont les tunnels des métros de Paris, de Lyon, de Marseille, du métro de Lille et du métro régional (RER) de Paris. La liste des opérations est présentée dans l'annexe II C.

Les observations disposées peuvent être classées en 3 familles selon le mode d'exécution, la longueur réalisée et le type de réseaux (Fig II.1):

- Exécution en souterrain- Métros urbains
- Exécution en souterrain- Métro régional
- Tranchées couvertes- Métros urbains

Fig II.1- Distribution des coûts de tunnels hors équipements selon le mode d'exécution, la longueur réalisée et le type de réseaux

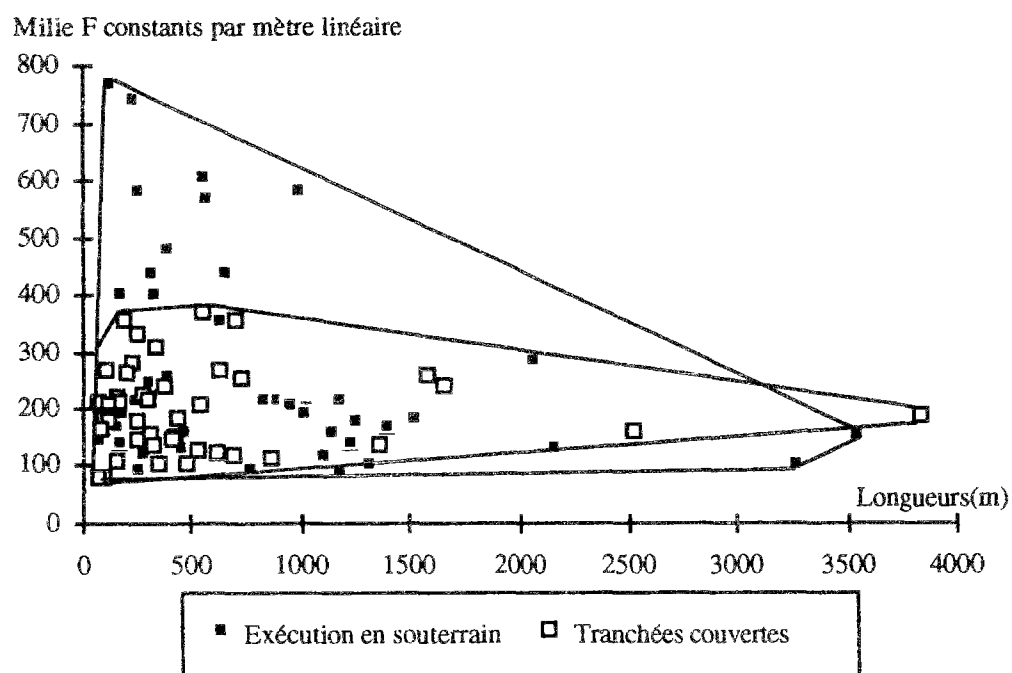


	Moyenne	Ecart type	Maximum	Minimum	Nb observa	Total en m
Exécution en souterrain- Métros urbains	163	47	257	87	32	29561
Tranchées couvertes- Métros urbains	197	75	366	79	43	23747
Exécution en souterrain- Métro Régional	493	152	771	247	14	7600

Selon la méthode d'exécution, les coûts peuvent être classés aussi en deux familles:

- Exécution en souterrain
- Exécution en tranchée couverte

Fig II.2- Distribution des coûts de tunnels hors équipements selon le mode d'exécution et la longueur réalisée



	Moyenne	Ecart type	Maximum	Minimum	Nb observa	Total en m
En souterrain	263	178	771	87	46	37161
En tranchée couverte	197	75	366	79	43	23743

Ces figures montrent que le traitement dans leur ensemble de 89 observations est délicat.

II.3- Les méthodes de traitement des données

Un classement des coûts selon les méthodes d'exécution des travaux apparaît logique. En effet, La construction d'un tunnel de métro urbain ou régional peut être complètement différente suivant la méthode choisie. On distingue les tunnels exécutés en tranchée couverte (à ciel ouvert) ou en souterrain (voir chapitre I. Introduction: les techniques de construction).

Du fait de la différence des méthodes de construction et du type de réseau, un traitement des données par 3 étapes a été adopté dans cette étude:

Premièrement, un traitement séparément par type des réseaux et méthodes d'exécutions pour avoir une homogénéité de la famille des variables;

Deuxièmement, un traitement d'un ensemble des tunnels exécutés en souterrain (métros urbains et régionaux: 51 observation);

Troisièmement, un traitement dans l'ensemble de 89 observations (3 types de réseaux, 2 méthodes de construction distinguées).

Les résultats sont présentés successivement dans les chapitres III à V (Chapitre III: tunnels de métros urbains exécutés en souterrain; Chapitre IV: tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte; Chapitre V: tunnels de métro régional exécutés en souterrain).

Les résultats d'analyse de l'ensemble des 89 observations sont présentés dans le chapitre VI. Il est facile de constater que les méthodes d'exécution des travaux en souterrain sont identiques pour le métro urbain et régional malgré la différence entre ces deux types de réseaux, c'est pourquoi dans le chapitre VI, on distingue l'ensemble de 51 observations (tunnels exécutés en souterrain de métros urbains et régionaux) et l'ensemble des 89 observations (deux méthodes de construction, 3 types de réseaux tout confondu).

L'étude a mis l'accent sur les coûts de génie civil, de déviation des réseaux, d'acquisition de foncier, appelé les *coûts hors équipements*. Suivant les résultats d'analyse, les coûts hors équipements représentent un pourcentage important, de 60 à 90 % du coût total.

Pour trouver les causes de la dispersion des coûts et les facteurs déterminants de ces coûts, la méthode utilisée à cette effet fait appel à la méthode économétrique (régression linéaire ou multiple). Cette méthode cherche à établir une relation entre une variable dépendante à expliquer (le coût) et un certain nombre de variables explicatives (facteur d'influence sur le coût: ouverture, profondeur etc.).

Dans le calcul, on distingue les variables quantitatives (volume de structure, profondeur etc.) et qualitatives (méthodes d'exécution, conditions géologiques etc.). La prise en compte des deux types de variables est différente.

Pour les variables quantitatives, on prend simplement les valeurs (par exemple: $A_n = 80, 90$; $V_s = 36 \text{ m}^3$).

Quand à la variable explicative qualitative, dans l'analyse par la régression, on peut introduire des variables explicatives désignant l'aspect qualitatif de certains phénomènes: géologie bonne ou faible, ouvrage localisé au centre ville ou à la périphérique. On assigne à une telle variable la valeur 1 ou 0 qui indique si une condition (par exemple, géologie bonne) est remplie ou non, que telle condition est en jeu ou non. Dans le calcul, Les variables explicatives qualitatives sont transformées ainsi en variables muettes prenant les valeurs 0 (lorsque une variable explicative ne corresponde pas un ouvrage) ou 1 (lorsque une variable explicative corresponde un ouvrage). Pour une variable explicative qui a plusieurs modes, on a procédé de la

même façon, mais moins une, par exemple 3 types de réseaux: TC (tranchée couverte), Su (souterrain - métros urbains), Sr (Souterrains - métro régional), il suffit d'en prendre 2 (si ce n'est ni TC, ni Su, bien sûr c'est Sr, la troisième).

Les coefficients des variables explicatives sont déterminés par des différents tests (La valeur t de Student obtenue doit être supérieur à celle figurant dans une table t de Student; Le coefficient de détermination, appelé R^2 caractérise la qualité de la corrélation, et doit être le plus proche possible de l'unité) Cette méthode permet de sélectionner les variables "explicatives" les plus significatives parmi une famille de variables, par conséquent de trouver la formule qui reproduit le plus correctement possible le coût. Cette formule peut servir par la suite pour le calcul de coût prévisionnel sous réserve que le projet estimé présente des conditions comparables aux échantillons.

Cette recherche est accompagnée de nombreuses visites de chantiers et de contacts avec des spécialistes (voir les annexes II-D et II-E).

L'indice PIB 1990 est choisi comme inflateur pour corriger et comparer les coûts des tunnels dans le temps, parce que l'indice PIB est significatif. Les coûts établis hors TVA ont été ramenés au Mille F constants par mètre linéaire.

II.4 - Conclusion

Avec une série continue sur 15 ans concernant les coûts de construction des tunnels de métros français, on envisage de connaître l'évolution des coûts dans le temps, ainsi que les facteurs déterminants des coûts, en utilisant des méthodes statistiques et économétriques.

CHAPITRE III

L'EVOLUTION DES COUTS DES TUNNELS DE METROS URBAINS EXECUTES EN SOUTERRAIN

Cette étude est basée sur 32 observations de 29 561 mètres au total qui sont des ouvrages réalisés en France pendant la période de 1975 à 1989. Les prix ont été déflatés selon l'indice PIB 1990. Le matériel roulant n'est pas compté.

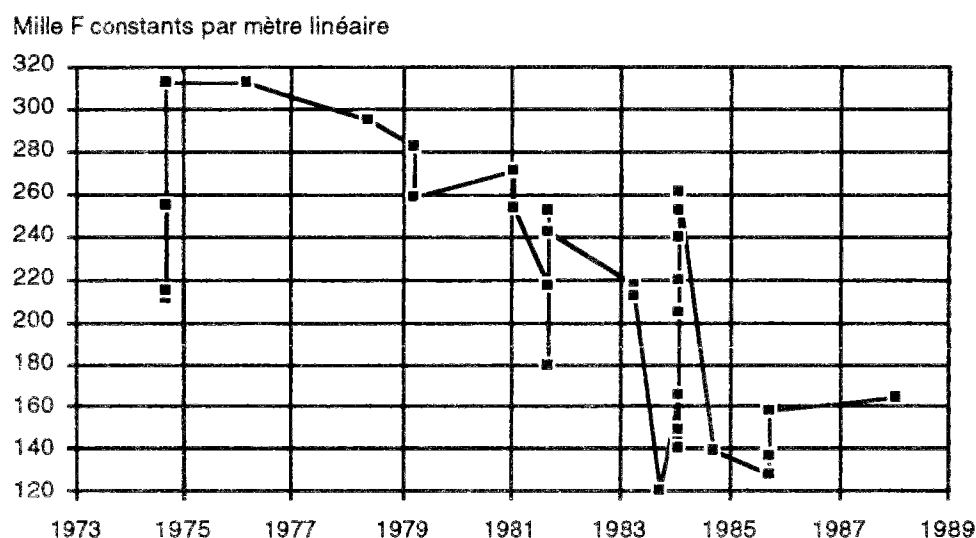
III.1- L'état des coûts de tunnels

III.1.1- Le coût total

Le coût total des 32 ouvrages en ligne (ou tunnels exécutés en souterrains) des métros français est présenté sur la figure III.1 et l'annexe III.A. Le coût total est la somme de 11 postes de dépense (voir tableau III.1). Le coût est exprimé en mille francs constants par mètre linéaire du tunnel. L'examen des coûts montre:

- Les coûts sont dispersés, de 128,4 à 312,1 mille francs par mètre linéaire, donc un rapport de 1 à 3 (moyenne pondérée: 204,9; maximum: 312,1; minimum 128,4);
- La tendance à la baisse des coûts pendant 15 ans (figure III.1) .

Fig. III.1- Distribution du coût total des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain par période



III.1.2- Le contenu du coût total

Les postes de dépenses pris en compte du coût total sont présentés dans le tableau III.1.

Tableau III.1- Coûts des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain par postes de dépense (En mille F constants par mètre linéaire)

Postes de dépenses	Moyenne pondérée	Maximum	Minimum
Traitement de terrain	14,9	86,7	0,0
Gros oeuvre	105,9	207,2	63,0
Déviations des réseaux	8,8	39,3	0,0
Foncier	2,4	32,3	0,0
Second oeuvre	1,7	5,2	0,0
Voie	20,4	28,8	8,2
Ingénierie	21,0	49,6	6,9
Equipements de ventil.clima.épuisemen	1,4	4,6	0,0
Equipements des courants forts	9,3	23,9	1,8
Equipements des courants faibles	8,1	23,2	0,0
Dépenses divers	6,0	36,0	0,0

Le tableau III.1 donne le coût minimum, maximum et la moyenne pondérée de chaque poste de dépense. Les colonnes maximum et minimum montrent

qu'il y a beaucoup de postes dont le coût va de 0 à une valeur élevée. Le 0 signifie le poste de dépense n'existe pas ou manque de donnée.

III.1.3- La répartition des coûts moyens en %

La figure III.2 donne la répartition des coûts moyens en % des postes de dépense (Voir aussi l'annexe III.B). Nous y constatons ainsi que:

- Le gros oeuvre occupe le poste de dépense le plus important, qui représente 33,5 à 79 % du coût total, 52,1 % en moyenne.
- Le coût des traitements de terrain varie de 0 à 34,4%, 9,15% en moyenne.
- Les coûts d'ingénierie, voie et traitement de terrain occupent des postes de dépense importants.
- Le coût de déplacement des réseaux représente de 0 à 13,8 %, 4,48% en moyenne.

Du fait que les coûts des équipements représentent une faible partie (la voie, les équipements de ventilation, de climatisation et d'épuisement, les équipements électriques), il paraît intéressant de regrouper les postes de dépense en deux catégories:

- Les *coûts hors équipements* regroupant les postes de gros oeuvres, le coût des traitements de terrain, le coût de déplacement des réseaux , le coût d'acquisition de foncier.
- Les *coûts des équipements* : Équipements des courants forts et faibles, de ventilation, de climatisation,d'épuisement, voie.

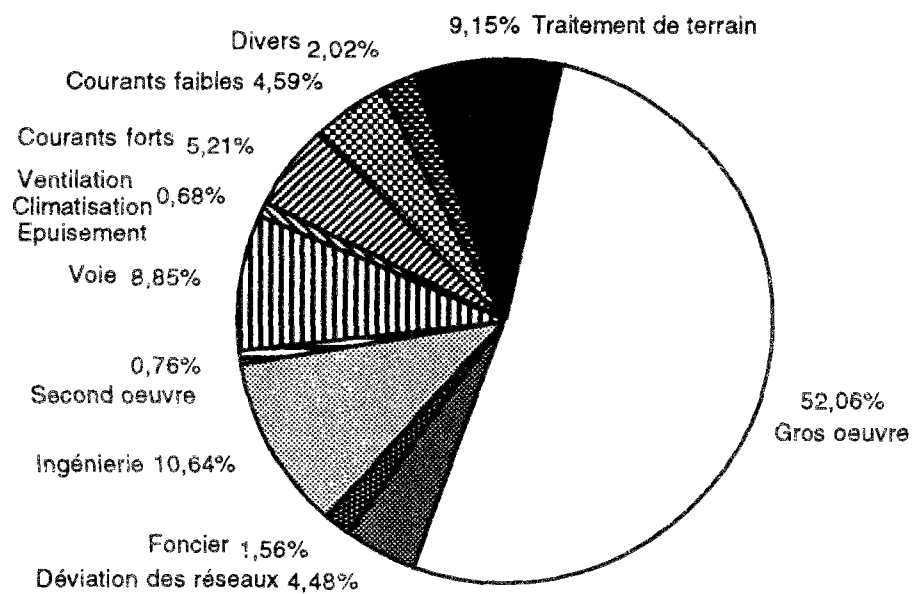
Par conséquent, l'étude met l'accent sur le coût hors équipements.

Ces deux catégories des coûts sont données dans l'annexe III-C. Il montre que:

$$\begin{aligned}
 100,0 &\rightarrow 100,0 \\
 14 &\rightarrow x \\
 x &= \frac{14 \times 100}{100,0}
 \end{aligned}$$

- Les coûts hors équipements (coût d'exécution des travaux) représentent de 61,8 à 87,1 % du coût total.
- Les coûts des équipements représentent de 7.9 à 34.2 %, en moyenne 19.3.

Fig III.2- Répartition des coûts moyens en % selon les postes de dépense des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain



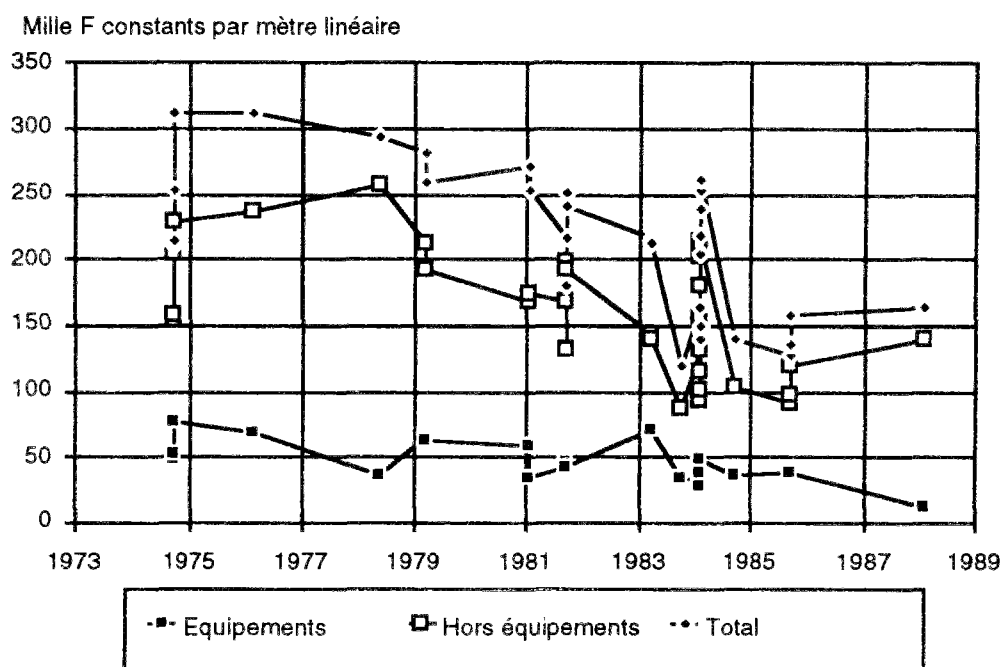
Les coûts des équipements feront l'objet du chapitre VII.

III.2 - l'évolution des coûts

III.2.1 - L'évolution des coûts

La figure III.3 donne l'évolution du coût total, des coûts hors équipements et des coûts des équipements.

Fig III.3- Évolution du coût total, des coûts hors équipements et des équipements des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain



	Moyenne pondérée	Maximum	Minimum
Coût total	204,9	312,1	128,4
Coûts hors équipements	154,3	256,6	90,8
Coûts des équipements	46,0	77,2	13,0

Nous y sommes conduits aux constatations suivantes:

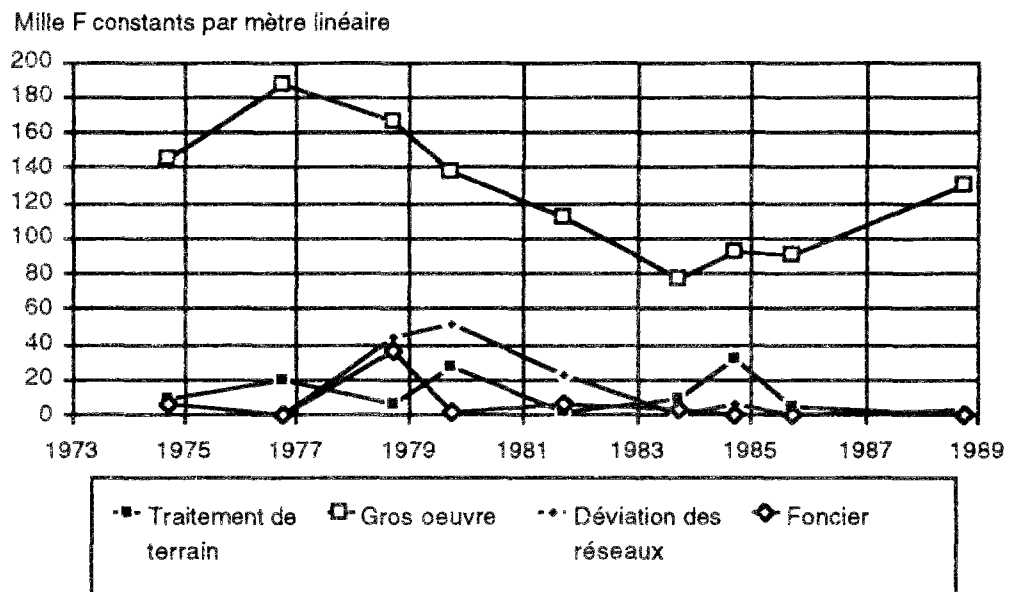
- Le coût total des ouvrages a baissé au même rythme que le coût hors équipements, deux conclusions s'imposent:
 - . les coûts hors équipements influencent le plus les coûts des tunnels;
 - . les coûts des équipements et d'ingénierie représentent un pourcentage fixe;
- Les coûts sont dispersés;
- Le coût des équipements a légèrement baissé.

La suite du chapitre n'examine que les coûts hors équipement. Le coût d'ingénierie est réparti sur tous les postes de dépense.

III.2.2- L'évolution des coûts hors équipements

Pour voir en détail ce qui s'est passé dans les coûts hors équipements, l'évolution de chaque postes de dépense a été examinée et présentée dans la figure III 4.

Fig. III.4- Évolution des coûts hors équipements en moyenne pondérée selon les postes de dépenses



Nous y constatons ainsi que:

- Le coût de gros oeuvre a beaucoup baissé. Ceci est très intéressant, parce que le coût de gros oeuvres représente en moyenne 53% du coût total. Nous pouvons alors dire que dans l'ensemble c'est lui qui fait baissé le coût total.
- Le coût des traitements de terrain, d'acquisition de foncier et de déplacement des réseaux ont légèrement baissé.

Après avoir étudié l'état et l'évolution des coûts, il est normal d'expliquer pourquoi les coûts des tunnels exécutés en souterrain sont dispersés, et quels sont les facteurs déterminants. Avec observations, plusieurs tentatives

d'études statistiques et économétriques ont été effectués dont les résultats sont présentés à la suite du chapitre.

III.3 - L'analyse des facteurs

Pour analyser les facteurs, un tableau concernant les caractéristiques des observations et les méthodes d'exécution a été élaboré et présenté dans l'annexe III.D dans lequel on trouve le coût de tunnel dans la première colonne et ensuite les caractéristiques de ce tunnel. Les données sont triées par les coûts décroissants. Il montre que le coût de tunnel est conditionné par les facteurs quantitatifs et qualitatifs suivants:

Facteurs quantitatifs:

An: Années de construction

Lg: Longueurs (m)

Lc: Localisation:

- Pa: Paris

- Pv: Province

Ov: Ouverture intérieure (m)

St: Section terrassée(m²)

Vs: Volume de structure (m³/ml)

Pf: Profondeur du rail par rapport au sol naturel (m)

Hi: Hauteur immergée (m)

Facteurs qualitatifs:

Ub: Urbanisation

- Cv: Centre ville

- Pu: Périphérie urbaine

- Uf: Urbanisation faible

Cg: Conditions géologiques

- Gb: Géologie (bonne cohésion ou roche)

- Gf: Géologie (faible cohésion)

- Gs: Géologie (sans cohésion)

Tr: Méthodes de terrassement

- Mp: Machine à attaque ponctuelle
- Mf: Machine à forer en pleine section
- Tm: Terrassement manuel
- Ex: Emploi de l'explosif

Ms: Méthodes de soutènement

- Ci: Cintre+planches de blindage
- Pr: Pré voûte
- Pd: procédés divers

Tt: Traitement de terrain

- Pt: Pas de traitement
- Ts: Traitement depuis la surface
- Tf: Traitement à partir du front de taille
- Ds: Divers

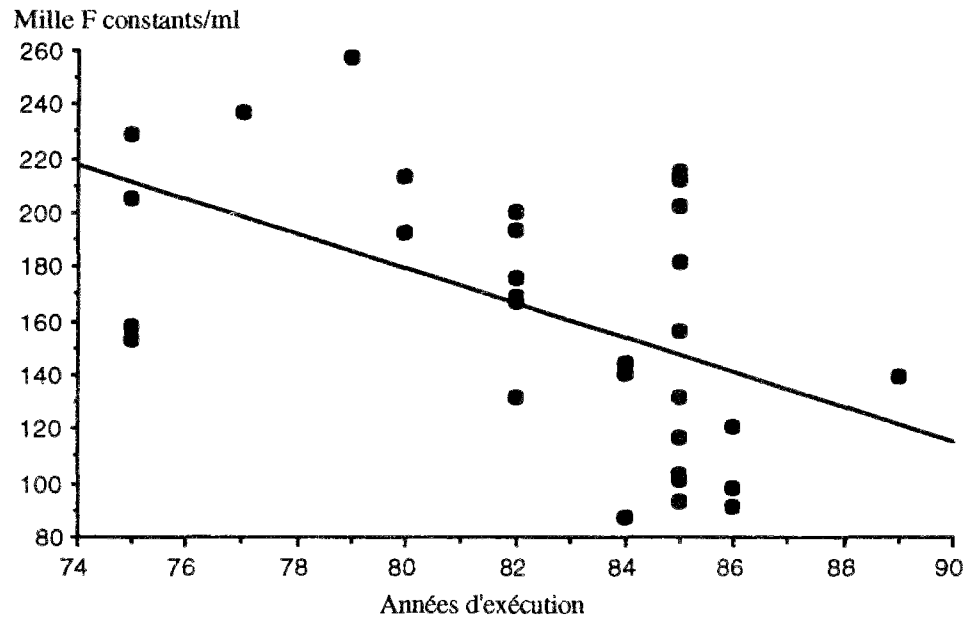
Il apparaît logique d'examiner d'abord les facteurs un à un pour avoir une idée de la relation entre le coût et chaque facteur, en suite dans leur ensemble.

III.3.1- L'analyse des facteurs pris isolément

Pour les facteurs (variables) quantitatives, il est aisé d'utiliser la méthode régression simple. Par contre, il n'est pas commode d'analyser les facteurs qualitatifs. On essaie de voir le coût en fonction de différentes méthodes ou facteurs. Tous les facteurs ont été analysés isolément mais les résultats ne sont pas intéressants et sont renvoyés au annexe III.E. Quelques résultats sont considérés significatifs.

L'évolution des coûts au cours du temps

Fig .III.5- Évolution des coûts hors équipements des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain



La formule issue de la régression est la suivante:

$$C = 691,6 - 6,4 \times \text{Années d'exécution}$$

(4,2) (-3,2)

La figure III.5 montre l'évolution des coûts hors équipements au cours du temps pour les tunnels des métros urbains exécutés en souterrain. Bien que la corrélation n'soit pas très bonne (le coefficient de détermination R^2 doit être proche de l'unité, mais le chiffre obtenu apparaît très faible: $R^2=0,25$), on peut néanmoins indiquer que cette famille de coûts présente une tendance à la baisse de l'ordre de 3,5 % en moyenne par an, soit 50 % environ au cours de 14 ans. Cette tendance est confirmée par les analyses par la régression multiple. Il faut noter que, sur cette figure, l'axe des abscisses ne recoupe pas celui des ordonnées à la valeur "0".

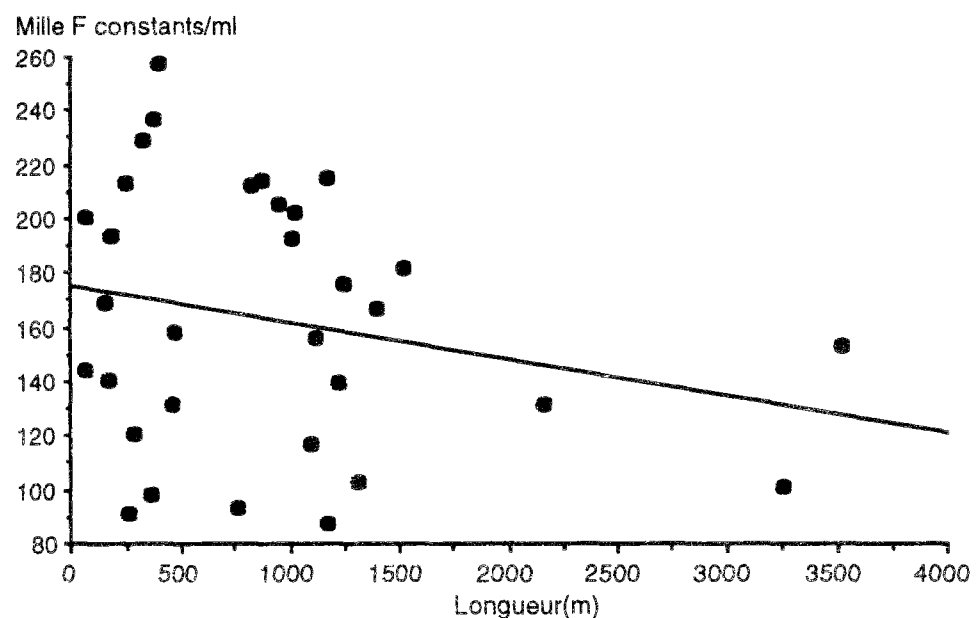
Pour comprendre la qualité de calcul par la régression, il faut voir la valeur t de Student obtenue qui est de 3,2, (qui est figurée entre les parenthèses en dessous de la formule), cette valeur doit être comparée à celui figurant dans une table (cette table donne un chiffre égal à 1,7). Si la valeur t calculée est

supérieur à ce chiffre, nous admettrons que la variable correspondante est significativement différente de 0 (à 95%). C'est le cas: Valeur t calculée est $3,2 > v_t 1,7$ avec v_t (valeur tabulaire).

Incidence de la longueur d'ouvrage

La figure III.6 présente le rapport entre le coût et la longueur des tunnels.

Fig. III.6- Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain en fonction de longueur réalisée



La formule issue de la régression est la suivante:

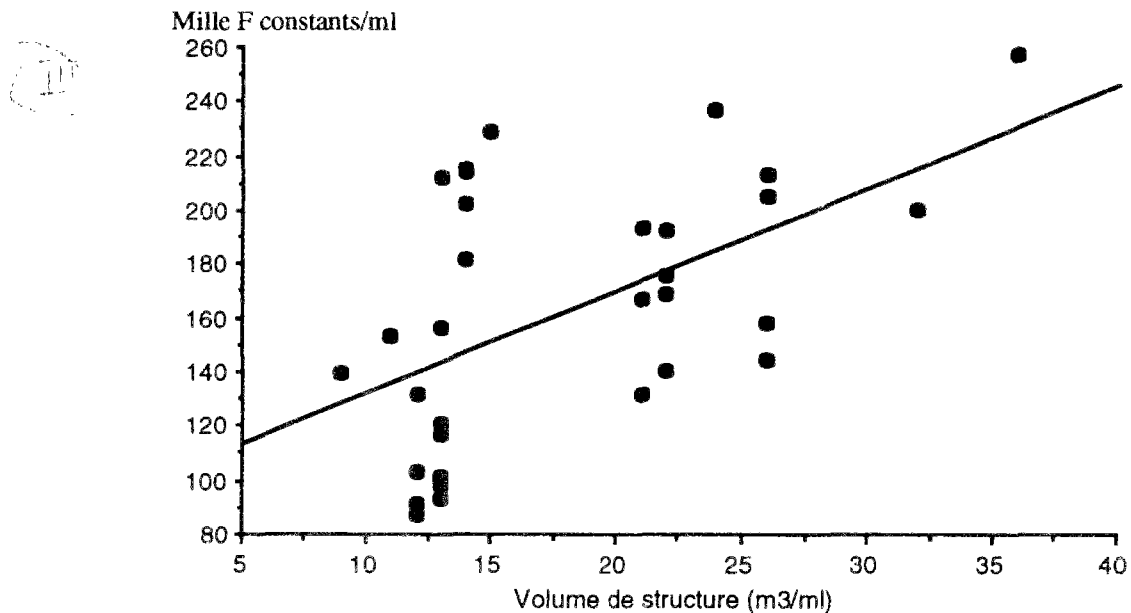
$$C = 175,7 - 0,014 \times \text{Longueur (m)}$$

(13,9) (-1,3)

Le R^2 est 0,05 qui montre que la relation entre le coût et la longueur d'ouvrage est très faible.

Incidence du volume de structure (m3/ml)

Fig. III.7- Coût hors équipements des tunnels de métros exécutés en souterrain (m3/ml) en fonction du volume de structure (m3)



La figure III.7 montre quant à elle la relation entre le coût hors équipements et le volume de structure mise en place en m3 par m linéaire (ml) du tunnel. Ce facteur constitue un élément important du coût bien que la corrélation n'est pas très bonne ($R^2=0,29$).

La formule issue de la régression est la suivante:

$$C = 94,74 + 3,79 \times \text{Volume de structure (m3/ml)}$$

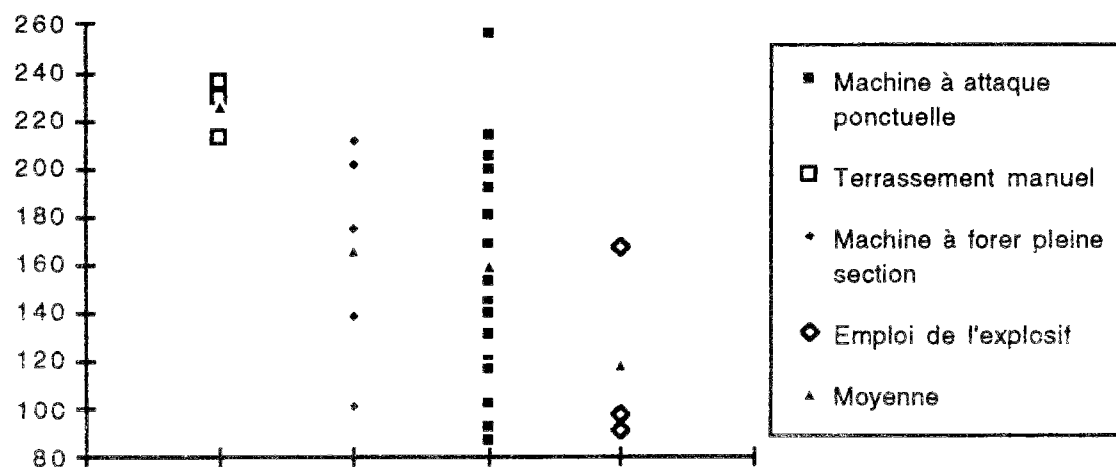
(4,5) (3,5)

La valeur de $t=3,5$ est supérieure à la valeur tabulaire. Donc le volume de structure en béton (m3) mise en place est un facteur sensible au coût. La réduction du volume de structure constitue un des moyens de la réduction des coûts des tunnels exécutés en souterrain.

Les méthodes d'exécution des travaux

Fig. III.8- Classement des coûts en fonction des méthodes d'exécution

Mille F constants par mètre linéaire



Méthodes d'exécution	Moyenne	Écart type	Maximum	Minimum	Nombre d'obser
Machine à attaque ponctu	160	44	257	87	21
Terrassement manuel	226	10	236	213	3
Machine à forer pleine sec	166	40	212	101	5
Emploi de l'explosif	119	34	167	91	3

La figure III.8 qui regroupe les méthodes d'exécution des travaux, nous donne les indications suivantes:

- Le terrassement manuel coûte le plus cher, cela s'explique par le coût élevé de la main d'oeuvre;
- La machine à attaque ponctuelle est largement utilisée et les coûts sont dispersés;
- Le coût diminue avec la mécanisation.

L'analyse des autres facteurs quantitatifs et qualitatifs pris individuellement n'a pas donné de résultats satisfaisants (voir annexe III E).

Cela n'a rien d'étonnant, car la formulation des coûts des tunnels est un complexe. Cependant, les analyses prouvent bien que les facteurs qualitatifs

et quantitatifs sont tous importants pour les coûts. Aussi convient-il de combiner plusieurs facteurs quantitatifs et qualitatifs et de les analyser par la méthode de la régression multiple.

III.3.2- L'analyse par la régression multiple

Les résultats de l'analyse de régression sont présentés au tableau III.2 (voir annexe III.F).

Ce tableau donne deux équations. Pour la première équation, On obtient R^2 : 0,80 avec 20 variables explicatives. Pour 32 observations, 20 variables explicatives apparaissent nombreux et leur valeurs t sont inférieures pour la plupart.

La deuxième équation a été obtenue avec 6 variables. Les autres variables qui ont les valeurs de t à un seuil significatifs de moins de 95 % ont été éliminées. La suppression des variables a été faite une par une tout en constatant la valeur de t; chaque fois, c'est la variable qui a la minimale de la valeur t a été éliminée. Au fur et à mesure de l'élimination des variables, la valeurs R^2 diminue, On obtient finalement R^2 : 0,70, Par rapport à l'équation de 20 variables, il y a une réduction de 14 variables, le R^2 a diminué uniquement de 0,1. Les variables éliminées et l'évolution de R^2 sont les suivantes:

- Le R^2 initial est 0,795 au initiale avec 20 variables.

<u>Variables éliminées:</u>	R^2
Pf: Profondeur du rail par rapport au sol naturel (m);	0,795
Pa: Paris	0,794
Hi: Hauteur immergée (m);	0,794
Tf: Traitement à partir du front de taille	0,794
Ov: Ouverture intérieure (m)	0,793
Ci: Cintre+planches de blindage;	0,791

Ts: Traitement depuis la surface	0,791
Gb: Géologie (bonne);	0,787
Cv: Centre ville;	0,778
Mp: Machine à attaque ponctuelle;	0,769
Pt: Pas de traitement;	0,758
Mf: Machine à forer en pleine section;	0,750
Tm: Terrassement manuel;	0,728
Gf: Géologie (faible);	0,697

Les facteurs pris en compte dans ce modèle sont les suivants: longueur de l'ouvrage, année de construction, section terrassée(m2), volume de structure(m3), urbanisation et méthode de soutènement.

$$C = 774,81 - 0,02.Lg - 5,76.An - 3,72.St + 6,0.Vs - 50,74.Pu + 41,11.Pr$$

(4,1) (-2,3) (-3,0) (-3,8) (4,3) (-3,7) (2,3)

Lg représente la longueur d'ouvrage en m.

An représente l'année de construction (Ex: 80, 90).

St représente la section terrassée de l'ouvrage en m2.

Vs représente le volume de structure en béton (m3) mise en place.

Pu = 1 pour la périphérie urbaine et 0 pour le centre ville.

Pr = 1 pour pré-voûte et 0 pour cintre+planches de blindage et procédés divers.

Le coefficient de détermination multiple R^2 est 0,70.

Les valeurs calculées de t de Student (qui sont entre les parenthèses) sont supérieures à la valeur t tabulaire: 2,1 au seuil de 97,5%.

Le résultat montre que les 6 variables sont significatives qui expliquent environ 70 % des coûts. Il reste encore 30 % des coûts inexpliqués.

Tableau III.2 - Métros urbains - Exécution en souterrain
Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives
Coût de tunnel (Mille F constants/ml)

Variable Expliquée	Variables explicatives																	Nb Cons- d'ob- servation			
Lg	An	Ov	St	Vs	Pf	Hi	Cv	Pu	Pa	Gb	Gf	Mp	Mf	Tm	Ci	Pr	Pt	Ts	Tf		
Coût de tunnel - Métros urbains - Exécution en souterrain (20 variables)																					
Mille F	-0,01 (-0,8)	-2,99 (-0,6)	1,88 (0,2)	-3,11 (-1,9)	5,64 (1,9)	0,07 (0,01)	0,33 (0,2)	-29,94 (-0,4)	-59,14 (-0,7)	9,18 (0,2)	-11,69 (-0,3)	-32,58 (-0,7)	24,02 (0,4)	29,83 (3,1)	56,87 (0,7)	-16,45 (-0,3)	23,97 (0,5)	-8,12 (-0,2)	13,26 (0,4)	-0,54 (-0,0)	504,2 (1,0)
Coût de tunnel - Métros urbains - Exécution en souterrain (6 variables, t > 95%)																					
Mille F	-0,02 (-2,3)	-5,76 (-3,0)	-3,71 (-3,8)	6,00 (4,3)				-50,74 (-3,7)								41,11 (2,3)				774,81 (4,1)	
																				32 (0,70)	

Notes:

An: Années de construction;
Lg: Longueurs (m);
Pa: Paris;
Ov: Ouverture intérieure (m);
St: Section tassée(m2);
Vs: Volume de structure (m3/ml);
Pf: Profondeur (m)

Hi: Hauteur immergée (m);
Cv: Centre ville;
Pu: Périphérie urbaine;
Gb: Géologie (bonne);
Gf: Géologie (faible);
Mp: Machine à attaque ponctuelle;
Mf: Machine à forer en pleine section;

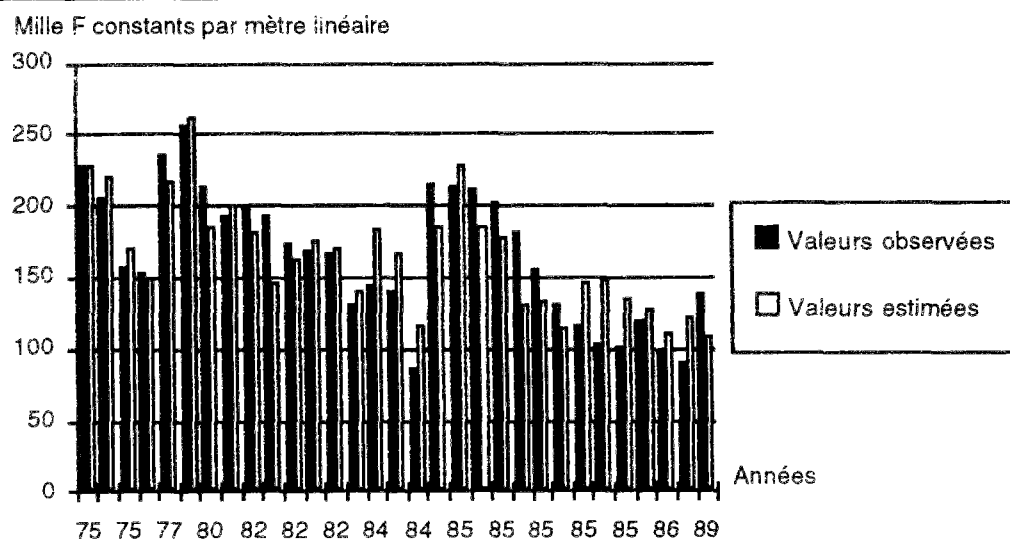
Tm: Terrassement manuel;
Ci: Cintre+planches de blindage;
Pr: Prévoûte;
Pt: Pas de traitement;
Ts: Traitement depuis la surface;
Tf: Traitement à partir du front de taille.

Cette équation donne les renseignements suivants:

- Les coûts des ouvrages en ligne de métros urbains exécutés en souterrain sont assez bien expliqués par les six variables.
- Il existe une économie d'échelle (longueur), mais elle n'est pas importante.
- Une décroissance des coûts au cours du temps (valeur -5.852 par an).
- Les coûts augmentent avec le volume de structure.
- L'urbanisation est un facteur important.
- La pré-voûte est une méthode onéreuse, mais elle concerne des ouvrages difficiles.
- La section de terrassement et le volume sont deux facteurs liés; dans ce modèle les deux sont significatifs.
- La pré-voûte est une méthode onéreuse, mais elle concerne des ouvrages difficile.

Une comparaison des coûts observés et des coûts calculés par l'équation de 6 variables a été faite (voir la figure III.9).

Fig. III.9- Comparaison des coûts observés et des coûts calculés par l'équation de 6 variables



La figure III.9 semble que les coûts sont bien reproduits par l'équation.

Une autre analyse factorielle a été faite également grâce à M. Bernard LABBE, spécialiste de statistique. La méthode utilisée appelée ELISEE: Étude des Liaisons et Interactions par Segmentation d'un Ensemble Expérimental, qui traite un fichier de données par segmentations successives.

Chaque segmentation, effectuée sur un sous-ensemble d'observations, ou groupe, vise à obtenir deux sous-groupes, définis par une partition des modalités d'un facteur, qui soient aussi distincts que possible du point de vue du critère. Le facteur choisi est donc celui qui présente la plus grande liaison (corrélation) avec le critère.

Les résultats d'analyse de l'ensemble des observations (tunnels métros urbains et régionaux exécutés en tranchée couverte et en souterrain) par l'ELISEE montrent que (voir annexe III G) les facteurs les plus intéressants pour tous les tunnels enterrés semblent donc:

- Année de construction;
 - Volume de structure en béton;
 - Section terrassée;
 - Ouverture de tunnel;
- et le type d'ouvrage (en souterrain ou en tranchée couverte).

Ces résultats correspondent à ceux de la régression multiple, constituant un complément d'analyse des facteurs.

Il serait absurde de croire que l'analyse par la régression peut expliquer en totalité un phénomène des coûts complexes des tunnels. Néanmoins, quelques relations significatives ont pu être dégagées, permettant une meilleure compréhension du problème.

III.4 - Conclusion

Les multiples tentatives d'analyse ont mis en évidence l'état du coût global, des coûts hors équipements et des coûts des équipements des tunnels de métros urbains exécutés en souterrain, ainsi que sa composition, sa ventilation en pourcentage, son évolution dans le temps et ses rapports avec les caractéristiques des travaux.

L'analyse statistique des coûts, notamment par la régression simple et multiple a permis de bien comprendre le phénomène complexe du coût de tunnel. Elle a donné la possibilité de prévoir. Toutefois, l'emploi des formules est plus complexe et leur fiabilité reste relative, les paramètres obtenus restant liés aux échantillons. La prise en compte de nouveaux ouvrages pourrait conduire à des résultats différents.

CHAPITRE IV

L'EVOLUTION DES COUTS DES TUNNELS DE METROS URBAINS EXECUTES EN TRANCHEE COUVERTE

Cette étude est basée sur 43 échantillons de 23743 mètres au total qui représentent les principaux tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte au cours de la période de 1975 à 1989 en France. Les prix ont été déflatés selon l'indice PIB 1990.

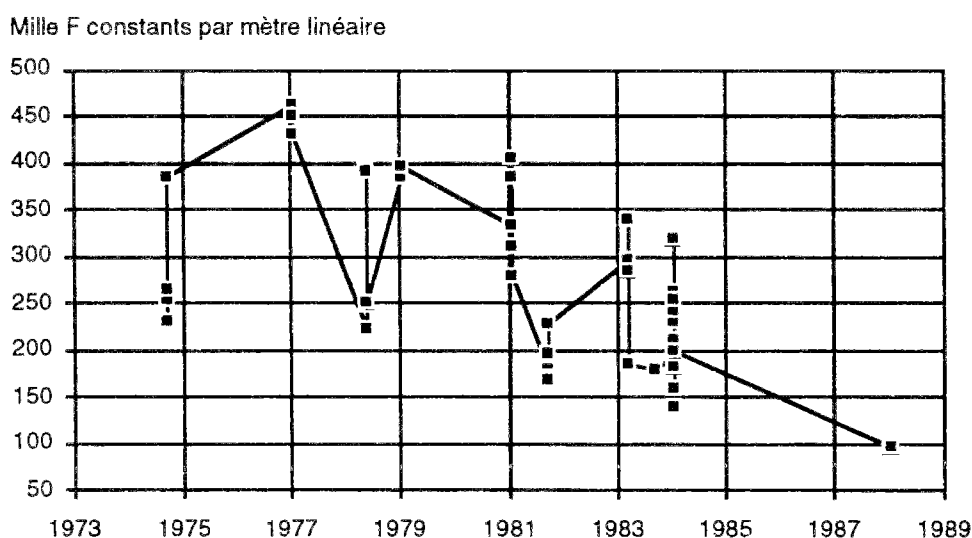
IV.1. L'état des coûts de tunnels

IV.1.1. Le coût total

La figure IV.1 donne la fourchette du coût total des 43 échantillons par période (voir annexe IV.A). Elle montre que:

- Les coûts sont dispersés, entre 95,8 et 462,9 (moyenne pondérée: 271,8).
- Il existe une tendance à la baisse dans le temps.

Fig. IV.1 - Distribution du coût total des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte par période



IV.1.2- Le contenu du coût total

Les postes de dépenses pris en compte du coût total d'un tunnel sont présentés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 - Coûts des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte par postes de dépense (en mille F constants par mètre linéaire)

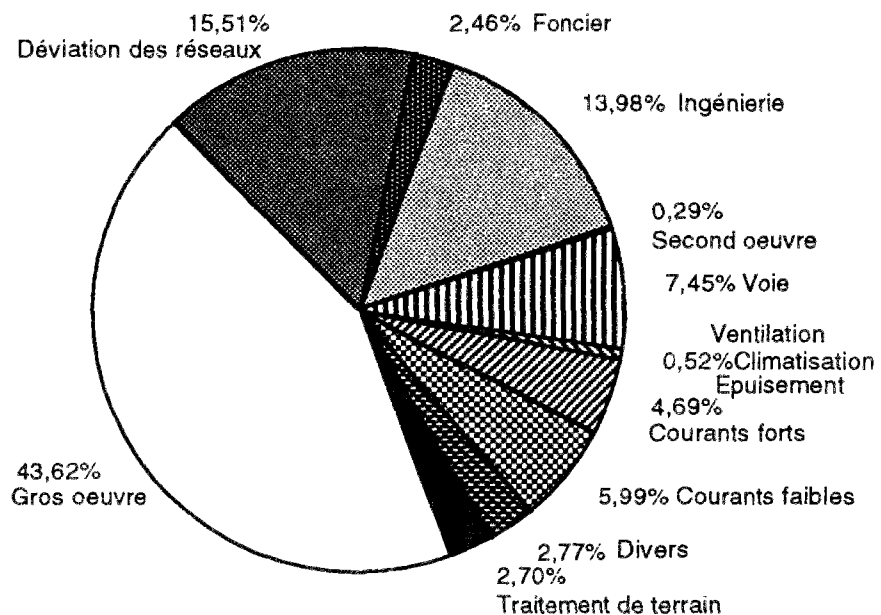
Postes de dépenses	Moyenne pondérée	Maximum	Minimum
Traitement de terrain	4,3	58,0	0,0
Gros oeuvre	109,9	230,6	43,6
Déviations des réseaux	47,8	134,4	3,2
Foncier	4,8	32,8	0,0
Second oeuvre	0,6	5,4	0,0
Voie	22,6	47,6	8,4
Ingénierie	39,8	117,0	4,3
Equipements de ventil.clima.épuisemen	1,1	4,8	0,0
Equipements des courants forts	9,7	36,3	2,9
Equipements des courants faibles	14,9	37,6	0,0
Dépenses divers	16,3	83,3	0,0

Les coûts maximums , minimums et moyens pondérés par longueur de l'ouvrage de chaque poste sont présentés dans le tableau IV.1 qui montre que les coûts des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte sont composés de 11 postes de dépense. Nous avons constaté que le gros oeuvre et la déviation des réseaux sont importants par rapport aux autres postes. Cela est normal parce que les tunnels exécutés en tranchée couverte sont près de la surface, par conséquent, ils rencontrent les réseaux urbains.

IV.1.3. La répartition des coûts moyens en %

La répartition en pourcentage des postes de dépense en moyenne est présentée dans l'annexe IV.B et la figure IV.2.

Fig IV.2 - Répartition des coûts moyens en % des postes de dépense des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte



L'examen de cette figure appelle les commentaires suivants:

- Le gros oeuvre représente 27,6 à 71,0 % du coût total. Il constitue le poste de dépense le plus important.
- La déviation des réseaux qui représente de 1,7 à 35,5 % est le deuxième en importance.
- Le traitement du terrain et l'acquisition du foncier varient de 0 à 14,8 %.

Les postes de dépense peuvent être regroupés en deux types:

-Les *coûts hors équipements*, qui comprend les postes de dépense des traitements des terrains, de gros-oeuvre proprement dit (structures), déplacement des réseaux, rétablissements et réfections de voirie, d'acquisition de foncier et de second oeuvre. On peut constater que les coûts hors équipements représentent 58,8 à 90,1 % du coût total.

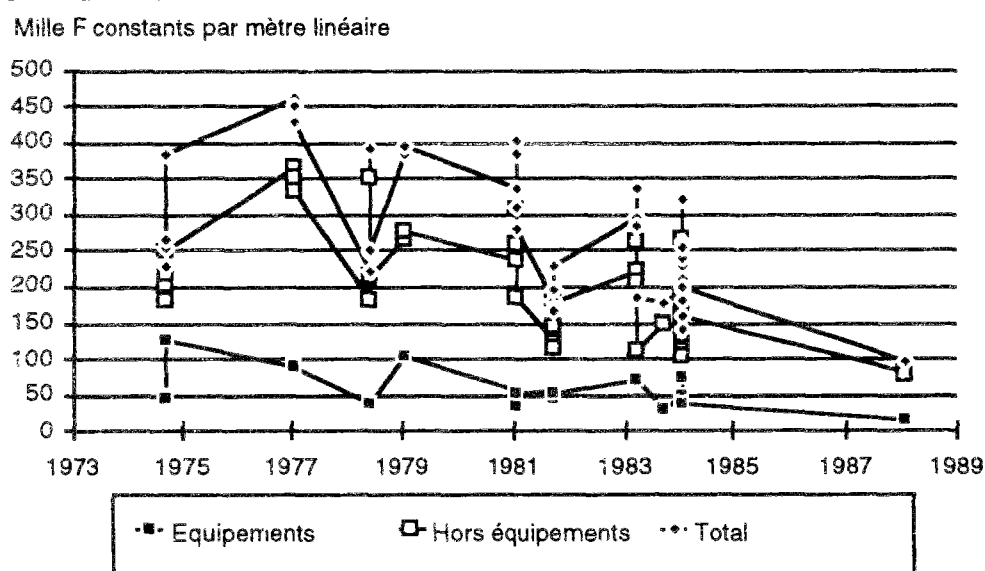
-Les *coûts des équipements*, qui regroupe les postes de dépense de voie, d'équipements de ventilation, de climatisation et d'épuisement,

d'équipements de courants forts et de courants faibles. Le coût des équipements représente en général un faible pourcentage par rapport au coût total.

IV.2- L'évolution des coûts

IV.2.1. L'évolution des coûts

Fig IV.3 - Évolution du coût total, des coûts hors équipements et des équipements des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte



	Moyenne pondérée	Maximum	Minimum
Coût total	271,8	462,9	95,8
Coût hors équipements	195,2	365,8	79,3
Coût des équipements	53,4	126,8	16,5

La figure IV.3 donne 3 plages des coûts durant 15 ans. Il apparaît clairement que:

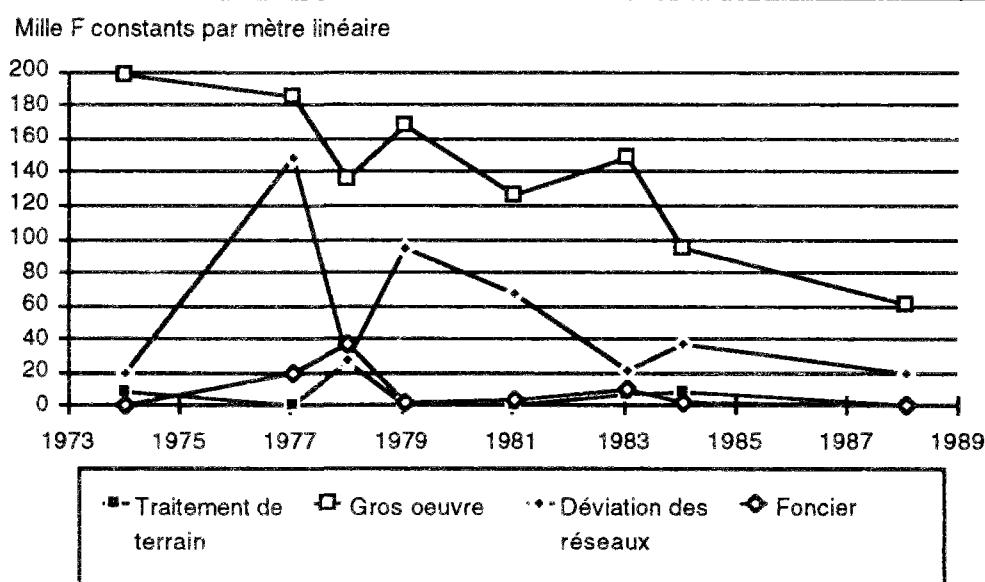
- Le coût total diminue au même rythme que les coûts hors équipements. On peut conclure que les coûts hors équipements (génie-civil) influencent le plus l'évolution du coût.

Les coûts des équipements sont faibles et stable, et seront analysés par le chapitre VII.

IV.2.2 - L'évolution des coûts hors équipements

Il faut rappeler que les coûts hors équipement sont composés de 4 postes de dépense. Pour connaître l'importance de chaque poste sur l'évolution des coûts, une analyse de leur évolution a été faite et les résultats sont présentés dans la figure IV.4. Il s'agit des coûts en moyenne pondérée par longueur de tunnel. Le coût d'ingénierie est réparti sur tous les postes de dépenses.

Fig. IV.4 - Évolution des coûts hors équipements en moyenne pondérée selon les postes de dépenses



On remarque que le coût de gros oeuvre diminue. Cela prouve encore une fois que l'origine de l'évolution du coût des tunnels reste dans le génie civil. Le poste de déviation de réseaux constitue la deuxième dépense.

IV.3 - L'analyse des facteurs

Après avoir vu l'état et l'évolution des coûts, la question se pose: Pourquoi les coûts sont dispersés ? Quels sont les facteurs qui conditionnent les coûts? Quelles sont les causes de l'évolution. La suite du chapitre analyse les facteurs. Les causes de l'évolution constituent le sujet du chapitre VIII.

Pour analyser les facteurs, un tableau concernant les coûts hors équipements et les caractéristiques des tunnels ainsi que les méthodes de construction a été élaboré et présenté à l'annexe IV D. Les analyses des relations entre coûts et les facteurs sont basées sur ce tableau. Les observations y ont été triées par coûts hors équipements décroissants. On constate qu'un tunnel de métro urbain exécuté en tranchée couverte est conditionné par les facteurs quantitatifs et qualitatifs suivants:

Variables (facteurs) quantitatifs:

An: Années de construction

Lg: Longueurs (m)

Lc: Localisation: - Pa: Paris; - Pv: Province

Ov: Ouverture intérieure (m)

St: Section terrassée(m²)

Vs: Volume de structure (m³/ml)

Pf: Profondeur du rail par rapport au sol naturel (m)

Hi: Hauteur immergée (m)

Ub: Urbanisation

- Cv: Centre ville

- Pu: Périphérie urbaine

- Uf: Urbanisation faible

Cg: Conditions géologiques

- Gb: Géologie (bonne cohésion ou roche)

- Gf: Géologie (faible cohésion)

- Gs: Géologie (Sans cohésion)

Mt: Méthodes de terrassements

- Co: Ciel ouvert; - Sd: Sous dalle

Tp: Type de blindage périphérique

- Bl: Berlinoises

- Pm: Paroi moulée

- Pp: Paroi préfabriquée

- Pc: Paleplanches

So: Méthodes de soutènement

- Ss: Sans soutènement; - Bt: Butons

Me: Mesures prises vis à vis de la présence de l'eau

- Ir: Injection radier

- Po: Pompage

- Ri: Rideau d'injection périphérique

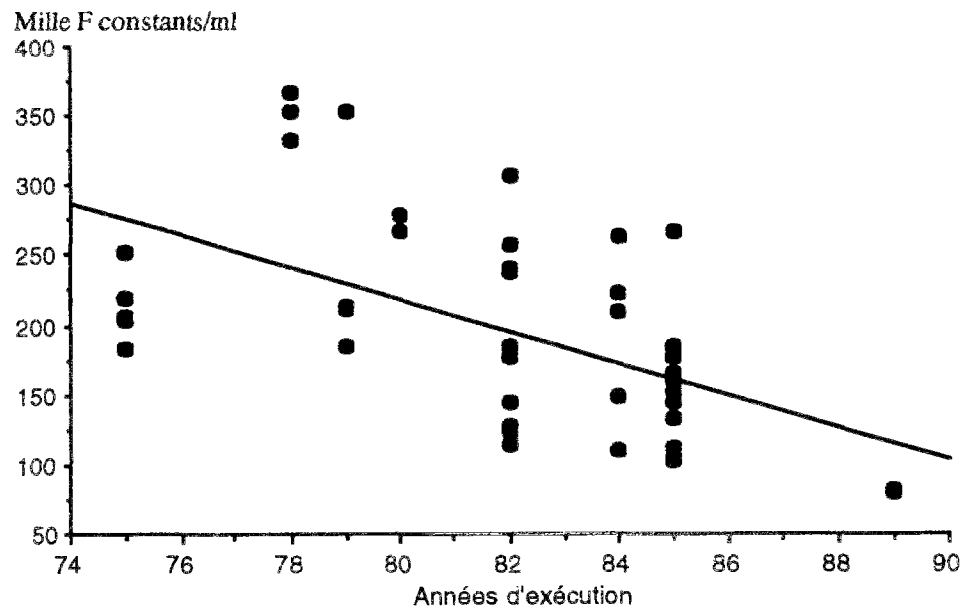
Pour connaître les facteurs les plus importants, voir la relation entre le coût et les facteurs, une analyse des facteurs pris isolément a été procédée.

IV.3.1 - L'analyse des facteurs pris isolément

Les facteurs du coût peuvent être classés en deux catégories: facteurs quantitatifs et qualitatifs. Les facteurs quantitatifs ont été analysés par la régression simple. Les facteurs qualitatifs sont examinés par un classement des méthodes d'exécution, d'urbanisation etc. Enfin, l'analyse des facteurs pris isolément n'a pas donné des résultats intéressants et sont renvoyés au annexe IV E. Quelques résultats sont considérés significatifs:

L'évolution des coûts au cours du temps

Fig.IV.5 - Evolution des coûts hors équipements des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte



La formule issue de la régression est la suivante:

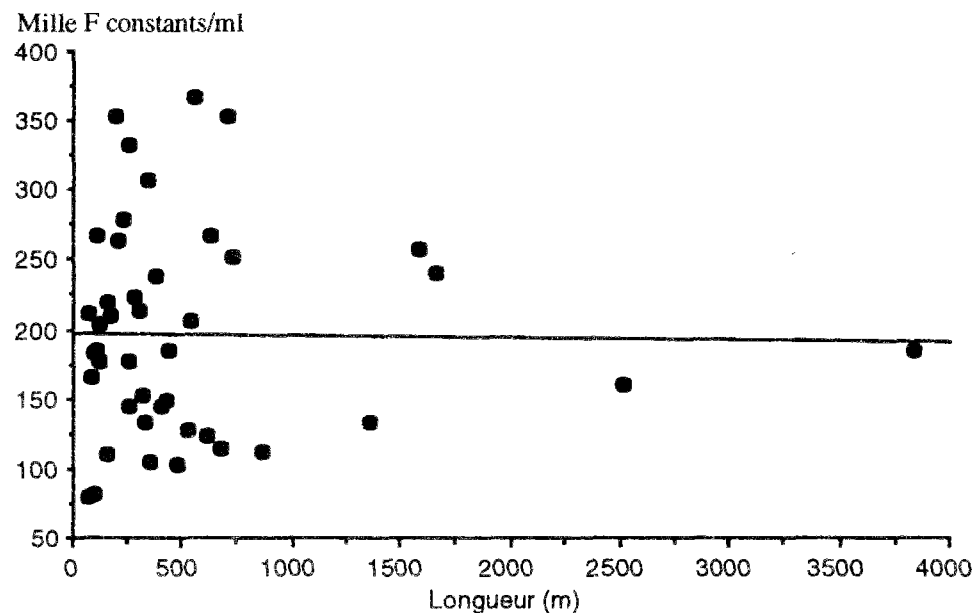
$$C = 1139,89 - 11,51 \times \text{Années d'exécution}$$

(4,2) (-4,3)

La figure IV.5 montre l'évolution des coûts au cours du temps pour les tunnels des métros urbains exécutés en tranchée couverte. Le coefficient de corrélation $R^2=0,31$ n'est pas très mauvais. La valeur t calculée = 4,3 > 2,0 valeur t de tabulaire au seuil de 97,5 %. Cela montre que le temps est un facteur significatif. On peut dire que le décroissement des coûts est de l'ordre de 60 % de 1975 à 1989, soit 4 % environ par an.

Incidence de la longueur d'ouvrage

Fig. IV.6 - Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte en fonction de la longueur réalisée



La formule issue de la régression est la suivante:

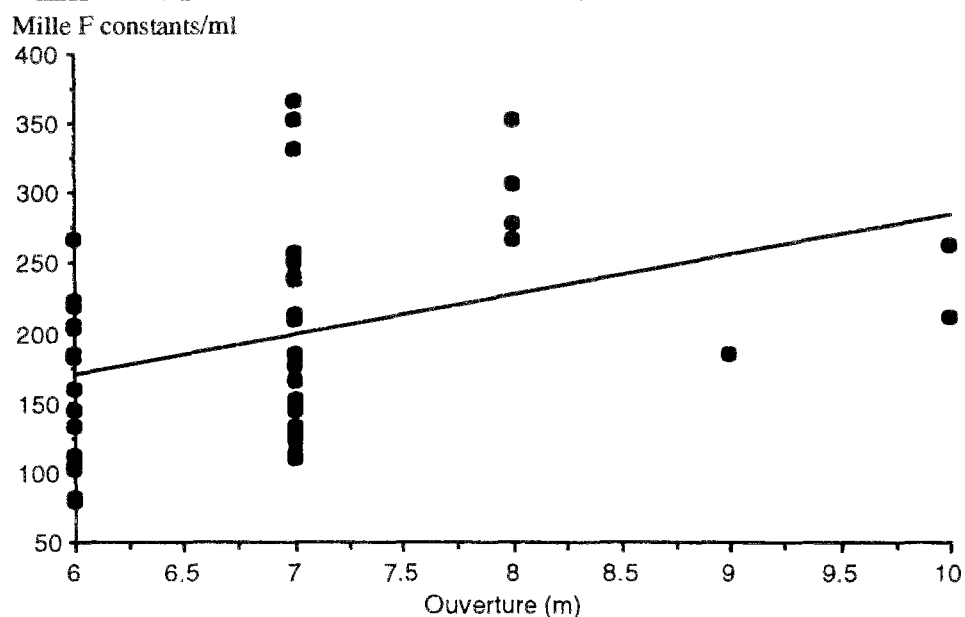
$$C = 197,6 - 0,002 \times \text{Longueur (m)}$$

(13,3) (-0,1)

La figure IV.6 montre que les coûts sont insensibles à la longueur pour les tunnels exécutés en tranchée couverte.

Incidence de l'ouverture de tunnel

Fig. IV.7 - Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte en fonction de l'ouverture



La formule issue de la régression est la suivante:

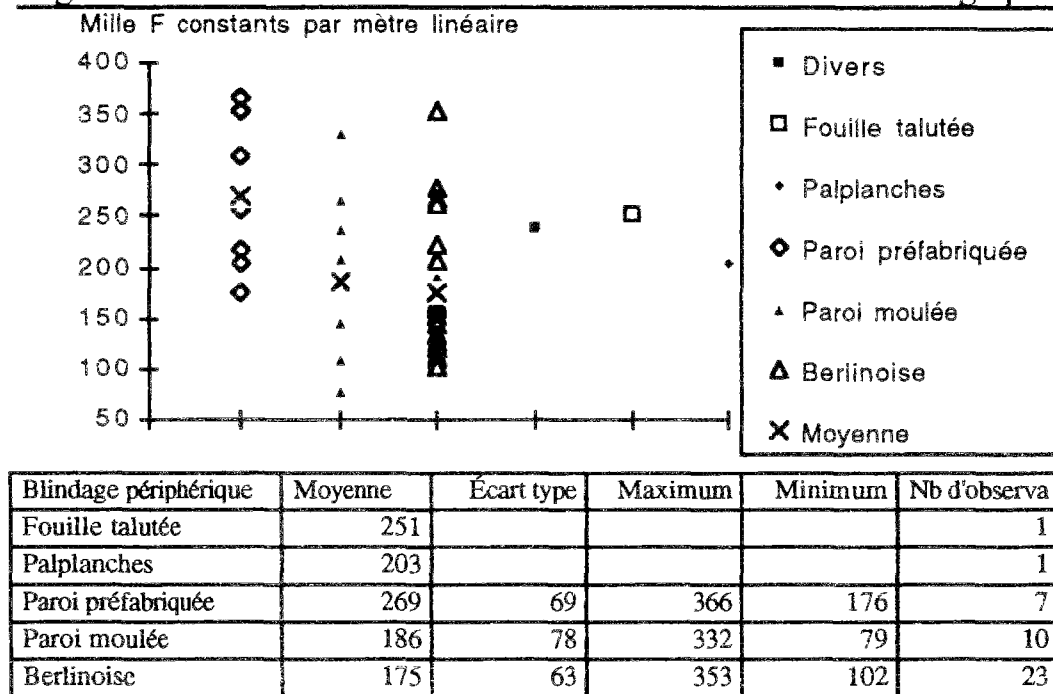
$$C = -83,69 + 37,44 \times \text{Ouverture intérieure (m)}$$

(-1,1) (3,8)

La figure IV.7 indique que l'ouverture (m) est un facteur peu sensible pour les coûts. Le R^2 est 0,14.

Incidence des méthodes de blindage périphérique

Fig. IV.8 - Coûts classés en fonction des méthodes de blindage périphérique



La figure IV.8 présente les coûts hors équipements en fonction des méthodes de blindage périphérique. Elle montre que:

- La méthode dite "berlinoise" est une méthode largement utilisée et plutôt économique.
- La paroi préfabriquée est moins économique.
- La paroi moulée est identique que la berlinoise du point de vue du coût, elle est utilisée surtout dans les ouvrages courts.
- Les observations concernant la méthode de palplanche et de fouille talutée sont limitées. Il est très difficile d'en tirer des renseignements.

Les analyses des coûts par les facteurs quantitatifs et qualitatifs pris isolément nous donnent très peu de renseignements significatifs (les résultats sont renvoyés au annexe IV E), parce qu'il y a plusieurs facteurs jouant en même temps. Les analyses montrent que les facteurs quantitatifs et qualitatifs ont tous des effets sur les coûts. Donc, il est utile d'approfondir l'analyse des facteurs pris dans leur ensemble avec des méthodes plus compliquées.

IV.3.2- L'analyse par la régression multiple

L'analyse des variables de la régression a été faite pour les coûts des tunnels de métros urbains. Les résultats sont présentés dans le tableau IV.2.

Les tableau présente 3 équations:

La première équation a été réalisée avec l'ensemble de 43 observations et de 22 variables explicatives. Le R^2 est 0,81. Les valeurs t sont inférieures en générale.

La deuxième équation a été faite, toujours avec l'ensemble de 43 observations, mais en éliminant 14 variables suivantes:

Variables éliminées:

	R^2
Gf: Géologie (faible);	0,805
Gb: Géologie (bonne);	0,804
Lg: Longueurs (m);	0,803
Ss: Sans soutènement;	0,801
Pu: Périphérie urbaine;	0,793
Ri: Rideau d'injection périphérique;	0,793
Pp: Paroi préfabriquée;	0,791
Pc: Palplanches	0,791
Po: Pompage;	0,775
Ir: Injection radier;	0,762
St: Section terrassée(m2)	0,761
Hi: Hauteur immergée (m);	0,756
Pf: Profondeur du rail par rapport au sol naturel (m);	0,755
Pa: Paris	0,736

Les variables qui ont la valeur t faible ont été éliminées. L'équation de 8 variables apparaît être significatif du point de vue statistique, mais il est très compliqué pour le utiliser, donc la troisième équation améliorée a été faite avec 39 observations et 4 variables (voir annexe IV.F).

Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en tranchée couverte

Equation de 8 variables:

$$C = 603,37 - 7,39.A_n + 40,09.O_v - 3,52.V_s + 26,01.C_v - 65,03.C_o \\ + 49,08.B_t - 46,70.B_l - 55,88.P_m$$

$\begin{matrix} (2,6) & (-2,6) & (5,8) & (-3,0) & (1,8) & (-2,6) \\ (2,5) & (-2,2) & (-2,1) \end{matrix}$

R² est 0,74

A_n représente l'année.

O_v représente l'ouverture intérieure de tunnel(m).

V_s représente le volume de structure en béton (m³/ml) mise en place.

C_v= 1 pour centre ville et 0 périphérie urbaine.

C_o= 1 pour le terrassement à ciel ouvert et 0 pour le terrassement sous dalle

B_t= 1 pour le soutènement par butons et 0 pour sans soutènement.

B_l= 1 pour berlinoises.

P_m=1 pour paroi moulée et 0 pour paroi préfabriquée et sans blindage.

Equation de 4 variables

Une amélioration de l'équation a été faite en éliminant 4 observations. Les résultats sont bons. Les facteurs pris en compte dans ce modèle amélioré sont les suivants: temps, ouverture, volume et urbanisation.

$$C = 995,38 - 12,85.A_n + 43,23.O_v - 3,06.V_s - 40,33.P_u$$

$\begin{matrix} (6,6) & (-7,7) & (6,8) & (-3,1) & (3,3) \end{matrix}$

A_n représente l'année d'exécution.

O_v représente l'ouverture intérieure de tunnel(m).

V_s représente le volume de structure en béton (m³/ml) mise en place.

Tableau IV.2 - Métros urbains - Exécution en tranchée couverte

Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives

Coût de tunnel (Mille F constants/ml)

Variable Expliquée	Variables explicatives																					Nb Cons- d'ob- R2		
Lg	An	Ov	St	Vs	Pf	Hi	Cv	Pu	Pa	Gb	Gf	Co	Ss	Bt	Pc	Bl	Pm	Pp	Ir	Po	Ri	Cons- tante serva tion	R2	
Coût de tunnel - Métros urbains - Exécution en tranchée couverte (22 variables)																								
Mille F	0,00	-8,56	26,3	0,74	-2,8	-5,36	-14,5	23,63	-11	-45,2	8,94	0,76	-73,93	-22,6	72,42	-68,73	-72,6	-89,30	-35,3	85,90	50,17	29,42	809,1	43
	0	(-2,0)	(2,0)	(0,9)	(-0,8)	(-0,7)	(-1,1)	(0,5)	(-0,2)	(-0,9)	(0,2)	(0,1)	(-1,8)	(-0,4)	(1,9)	(-0,7)	(-1,3)	(-1,3)	(-0,6)	(1,1)	(1,3)	(0,5)	(2,4)	0,81
Coût de tunnel - Métros urbains - Exécution en tranchée couverte (8 variables, t > 95%)																								
Mille F	-7,39	40,1		-3,52			26,01					-65,03		49,08		-46,70	-55,9					603,4	43	
	(-2,6)	(5,8)		(-3,0)			(1,8)					(-2,6)		(2,5)		(-2,2)	(-2,1)					(2,6)	0,74	
Coût des tunnels - Métros urbains - Exécution en tranchée couverte (4 variables, t > 95%)																								
Mille F	-12,9	43,2		-3,06				-40,3														995,4	39	
	(-7,7)	(6,8)		(-3,1)				(-3,3)														(6,6)	0,79	

Notes:

An: Années de construction;
Lg: Longueurs (m);
Pa: Paris
Ov: Ouverture inférieure (m)
St: Section terrassée(m2)
Vs: Volume de structure (m3/ml);
Pf: Profondeur du rail par rapport
au sol naturel (m);
Hi: Hauteur immergée (m);
Cv: Centre ville;
Pu: Périphérie urbaine;
Gb: Géologie (bonne);
Gf: Géologie (faible);
Co: Ciel ouvert;
Bl: Berlinoises;
Pm: Paroi moulée;
Pp: Paroi préfabriquée;
Pc: Paleplanche;
Ss: Sans soutènement;
Bt: Butons;
Ir: Injection radier;
Po: Pompage;
Ri: Rideau d'injection périphérique;

$P_u = 1$ pour périphérie urbaine et 0 pour centre ville.

Le coefficient de détermination multiple R^2 est 0,79.

L'analyse économétrique nous donne les renseignements suivants:

- Les coûts des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte sont bien expliqués par les variables: temps, ouverture, volume, urbanisation, méthodes de terrassement, de soutènement et type de blindage périphérique.
- Une décroissance des coûts au cours du temps.
- L'ouverture est un facteur déterminant.
- L'urbanisation est un facteur important.
- La méthode d'exécution à ciel ouvert est moins onéreuse par rapport à la méthode d'exécution sous dalle pour des tunnels en tranchée couverte.
- La méthode de soutènement par buton est onéreuse.
- Le type de blindage périphérique est un facteur déterminant, (berlinoises et paroi moulée sont moins onéreuses)
- La valeur obtenue sur le volume de structure semble paradoxal, mais elle est peu importante par rapport aux autres facteurs trouvés.

Bien sûr les analyses par la régression simple et multiple ne peuvent pas expliquer entièrement le phénomène complexe des coûts des tunnels en tranchée couverte. Cependant, elles nous permettent de bien comprendre ce phénomène et elles donnent la possibilité de prévoir approximativement le coût.

IV.4 - Conclusion

Cette analyse donne l'état et l'évolution des coûts des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte sur une période de 15 ans. Elle éclaire

sur la formation et la ventilation en pourcentage des coûts ainsi que sur l'importance des différents facteurs des coûts.

Les analyses des facteurs des coûts par la régression permettent de bien comprendre les rapports entre les coûts et les variables significatives, ainsi d'établir le modèle de prévision de grandeur.

CHAPITRE V

L'EVOLUTION DES COUTS DES TUNNELS DE METRO REGIONAL EXECUTES EN SOUTERRAIN

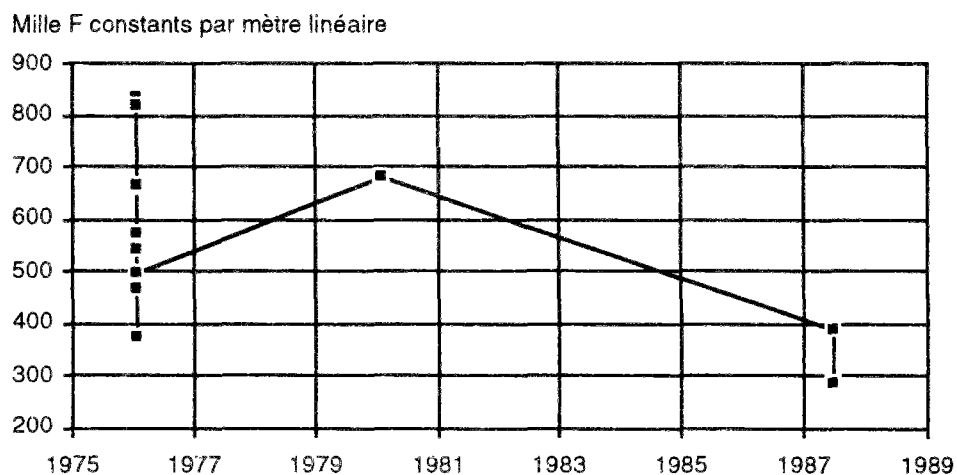
Les coûts des tunnels de métro régional (Réseau Express Régional à Paris) sont l'objet de ce chapitre. Les tunnels de ce métro régional ont un gabarit un peu plus grand par rapport aux tunnels de métros urbains. Les ouvrages étudiés se situent au centre historique de Paris, profonds volumineux et réalisés en souterrain. Ils constituent une famille des ouvrages spéciaux. Les opérations étudiées ici ont été réalisées pendant la période des années 1977, 1981 et 1988 et comportent seulement 14 ouvrages de 7600 mètres au total. Les prix ont été déflatés selon l'indice PIB 1990.

V.1- L'état des coûts

V.1.1- Le coût total et son contenu

La figure V.1 présente le coût total des tunnels du métro régional par période (voir annexe V.A).

Fig. V.1 - Coût total des tunnels de métro régional exécutés en souterrain



La figure V.1 nous donne les constatations suivantes, malgré le nombre limité d'échantillons:

- La première période de la construction a été marquée par une grande dispersion des coûts, allant de 285 à 836 mille F par mètre linéaire. La moyenne pondérée par longueur du coût total est de 514,5. La concentration des coûts dans les années 80 explique la maîtrise des coûts;
- Les coûts ont baissés après la première période de la construction.

Le coût total est composé des dix postes de dépenses suivants (tableau V.1):

Tableau V.1 - Coûts des tunnels de métro régional exécutés en souterrain par poste de dépense

Postes de dépenses	Moyenne pondérée	Maximum	Minimum
Traitement de terrain	78,9	285,4	3,9
Gros oeuvre	287,2	528,1	128,5
Déviations des réseaux	8,2	75,0	0,0
Foncier	7,3	16,9	0,0
Voie	12,6	16,4	5,9
Ingénierie	58,9	92,1	39,8
Équipements de ventil.clima.épuisemen	7,2	10,9	2,2
Équipements des courants forts	29,6	43,0	6,0
Équipements des courants faibles	19,7	28,7	10,8
Dépenses divers	4,9	8,2	0,0

Nous pouvons constater par ce tableau que :

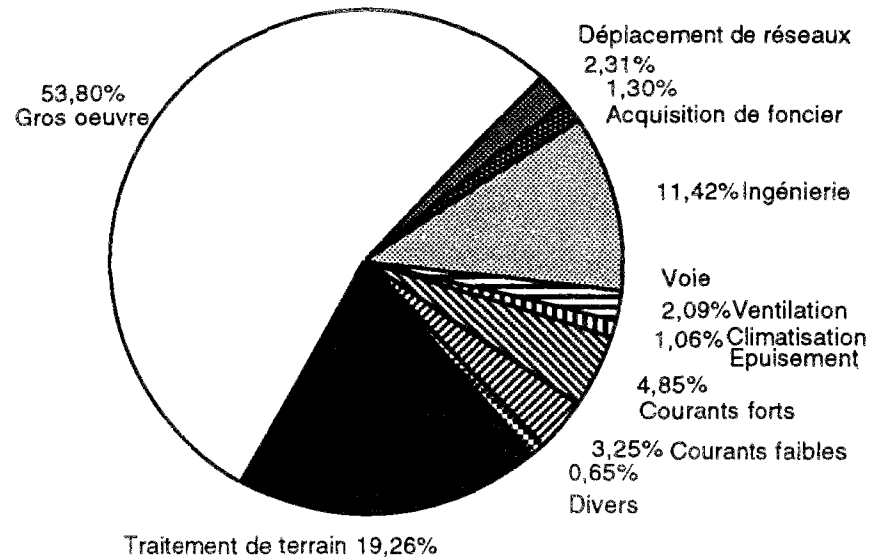
- Le gros oeuvre constitue le premier poste de dépense (entre 128,5 et 1056 mille F) représentant 43,5 à 63,1 % du coût total;
- Le traitement de terrain constitue le deuxième poste de dépense, allant de 7,8 à 571 mille F, représentant de l'ordre de 11 à 35 % du coût total;

-Du fait que ce réseau est profond, le déplacement des réseaux est moins important par rapport aux autres dépenses, entre 0 à 75 mille F qui représente de 0 à 16,1 %.

V.1.2- La répartition des coûts moyens en %

La figure V.2 présente la répartition des dépenses moyens en % du coût des tunnels de métros régionaux exécutés en souterrain.

Fig. V.2 - Répartition des coûts moyens en % selon les postes de dépense

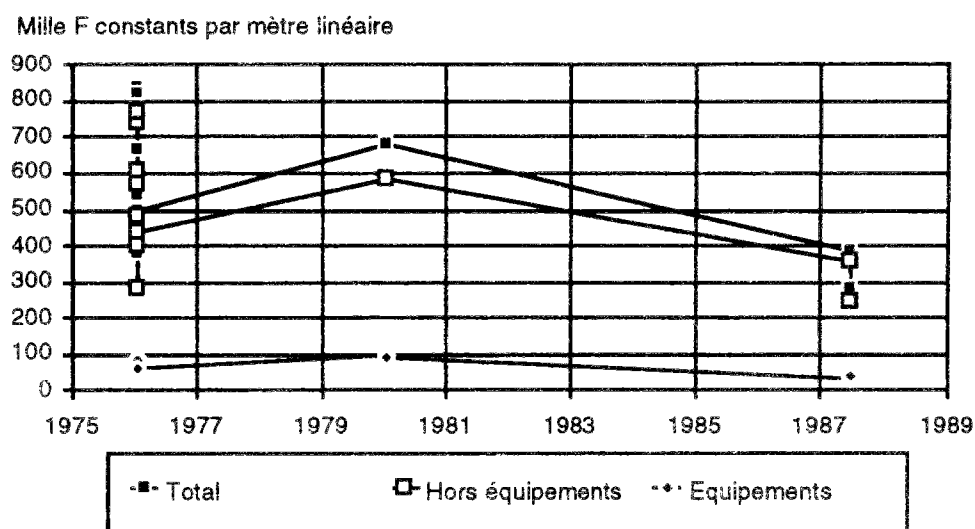


La figure V.2 fait apparaître nettement la prépondérance des postes: gros oeuvre et le traitement de terrain (73%). Nous pouvons dire que c'est la maîtrise de ces 2 postes qui a entraîné la baisse des coûts.

V.1.3- L'évolution des coûts

La figure V.3. présente l'évolution du coût total, coûts hors équipements et coûts des équipements.

Fig.V.3 - Evolution du coût total, des coûts des équipements et hors équipements



	Moyenne pondérée	Maximum	Minimum
Coût total	514,5	836,5	284,8
Coût hors équipements	431,1	771,3	247,3
Coût des équipements	77,9	95,9	32,9

La figure V.3 montre:

- Une tendance à la diminution des coûts. Le coût total a baissé du fait de la diminution des coûts hors équipements .
- Les coûts des équipements reste stable.

Après avoir examiné la ventilation et la répartition en % des coûts, il paraît très utile de regrouper les postes de dépenses en deux catégories:

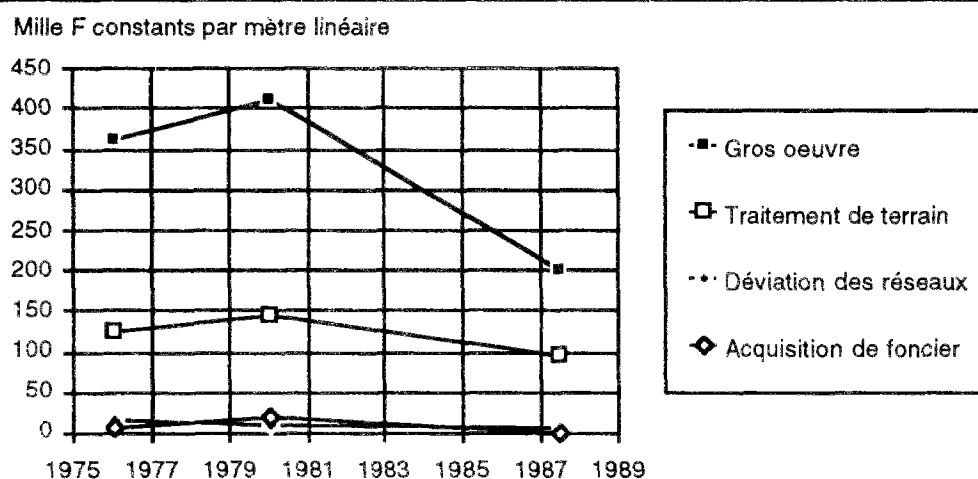
- Les *coût hors équipements* correspondent aux dépenses de traitements de terrain, de gros oeuvre, de déplacement des réseaux et d'acquisition de foncier. Ce sont les postes liés à la construction. Les valeurs sont entre 247,3 et 771,3 milles F/m linéaire qui représentent de 75,4 à 94,4 % du coût total.
- Les *coûts des équipements* liés aux infrastructures: voie, équipements électromécaniques, équipements de ventilation, de climatisation, courants forts et courants faibles, allant de 32,9 à 95,9 mille (de 5,6 à 22,4 %).

L'intérêt de ce regroupement est de distinguer clairement l'importance de deux types des coûts. On remarque que l'influence des coûts hors équipements est beaucoup plus forte que les coûts des équipements dans la formation du coût des tunnels. C'est pourquoi la suite du chapitre n'examine que les coûts hors équipements. Les coûts des équipements font l'objet du chapitre VII. Le coût d'ingénierie est réparti sur tous les postes de dépense.

V.1.4- Les coûts hors équipements

Une étude un peu détaillée sur les coût hors équipements ainsi que sur ces évolutions a été faite et les résultats sont présentés dans la figure V.4 (voir annexe V.B).

Fig. V.4 - Evolution des coûts hors équipements en moyens selon les postes de dépense



L'examen de la figure V.4 montre que le gros oeuvre et le traitement de terrain forment les deux dépenses les plus importantes, et entraînent la baisse du coût total.

Après avoir constater la situation et l'évolution des coûts, nous allons essayer d'aller encore plus loin, avec les méthodes statistiques et

économétriques, afin de connaître les facteurs déterminants des coûts, de trouver leurs rapports, de comprendre ce qui se passe derrière ces coûts.

V.2- L'analyse des facteurs

V.2.1- L'analyse des facteurs pris isolément

Pour mieux voir le coût et les facteurs, un tableau de synthèse a été élaboré et présenté à l'annexe V C. Ce tableau montre que les coûts de construction des tunnels sont pratiquement plus ou moins conditionnés par variables qui sont les suivants:

An: Années de construction

Lg: Longueurs (m)

Ov: Ouverture intérieure (m)

St: Section terrassée(m²)

Vs: Volume de structure mise en place (m³/ml)

Pf: Profondeur du rail par rapport au sol naturel (m)

Hi: Hauteur immergée (m)

Cg: Conditions géologiques

- Gb: Géologie (bonne cohésion ou roche)

- Gf: Géologie (faible cohésion)

Tr: Méthodes de terrassement

- Mp: Machine à attaque ponctuelle

- Mf: Machine à forer en pleine section

- Tm: Terrassement manuel

- Ex: Emploi de l'explosif

Ms: Méthodes de soutènement

- Ci: Cintre+planches de blindage

- Pr: Pré-voûte

- Bp: Béton projeté

Tt: Traitement de terrain

- Ts: Traitement depuis la surface

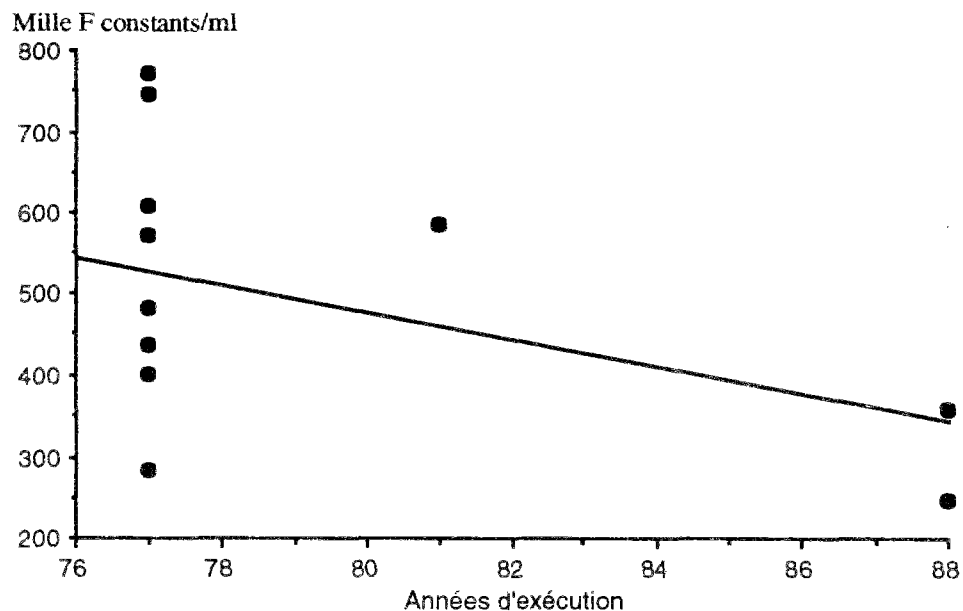
- Tf: Traitement à partir du front de taille

- Tg: Traitement à partir d'une galerie de pilote

L'analyse des facteurs pris un par un a été faite et elle n'a pas fourni de bons résultats (annexe V.D). Quelques résultats sont considérés significatifs:

L'évolution des coûts au cours du temps

Fig. V.5 - Evolution des coûts hors équipements des tunnels de métro régional



La formule issue de la régression est la suivante:

$$C = 1808,18 - 16,62 \times \text{Années d'exécution}$$

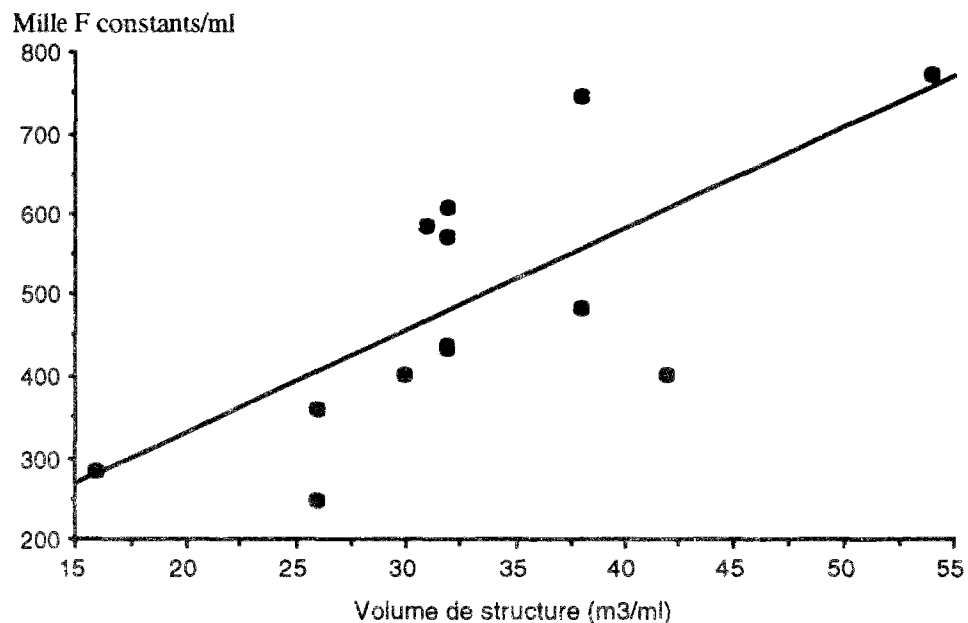
(2,2) (-1,6)

La figure V.5 montre une décroissance des coûts. Le nombre d'observation est très limité pour donner une tendance malgré le R^2 est 0,18 qui n'est pas nul .

Incidence du volume de structure (m3/ml)

La figure V.6 présente les résultats n'analyse du volume de structure en béton par la régression simple.

Fig.V.6 - Coûts hors équipements en fonction de volume de structure en béton



La formule issue de la régression est la suivante:

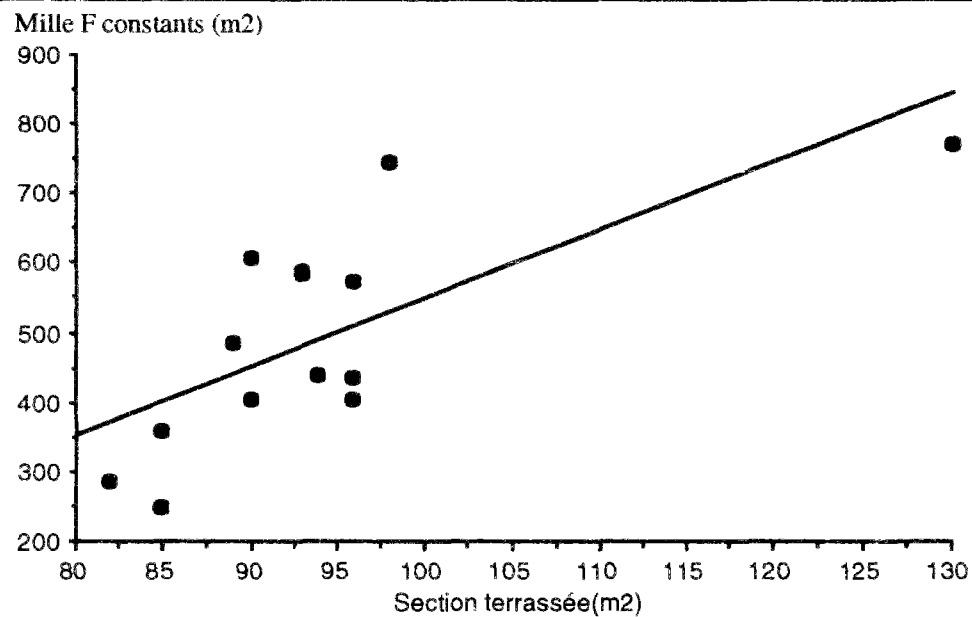
$$C = 80,82 + 12,54 \times \text{Volume de structure (m3)}$$

(0,6) (3,3)

La figure V.6 montre la relation des coûts hors équipements et les volumes de structure. Ce résultat est encourageant, car le coefficient de détermination $R^2 = 0,48$ n'est pas mauvais non plus. On peut conclure que le coût augmente avec le volume de structure en béton. Le volume constitue un facteur déterminant.

Incidence de la section terrassée (m2)

Fig. V.7 - Coûts hors équipements en fonction de la section terrassée



La formule issue de la régression est la suivante:

$$C = -432,83 + 9,84 \times \text{Section terrassée (m2)}$$

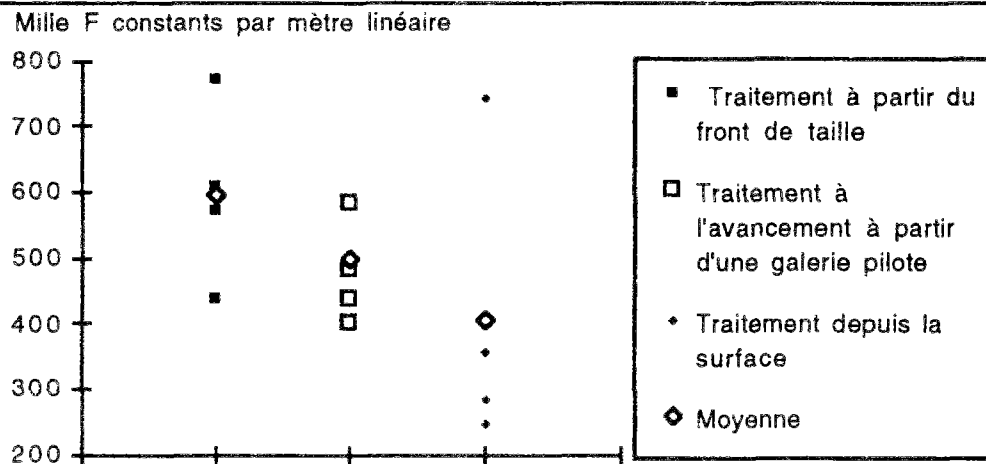
(-1,6) (3,5)

La figure V.7 présente des coûts hors équipements en fonction de la section terrassée(m2). La qualité de la régression n'est pas mauvaise avec $R^2=0,51$. Cela montre que la section set un facteur très significatif.

Incidence des méthodes de traitement de terrain

La figure V.8 fait apparaître 3 colonnes de nuage des coûts correspondant aux méthodes de traitements de terrain.

Fig. V.8 - Coûts hors équipements classés en fonction de méthodes de traitement de terrain



	Moyenne	Ecart type	Maximum	Minimum	Nb observat
A partir du front de taille	596	119	771	437	4
A partir d'une galerie pilote	498	75	583	437	5
Depuis la surface	406	181	743	247	5

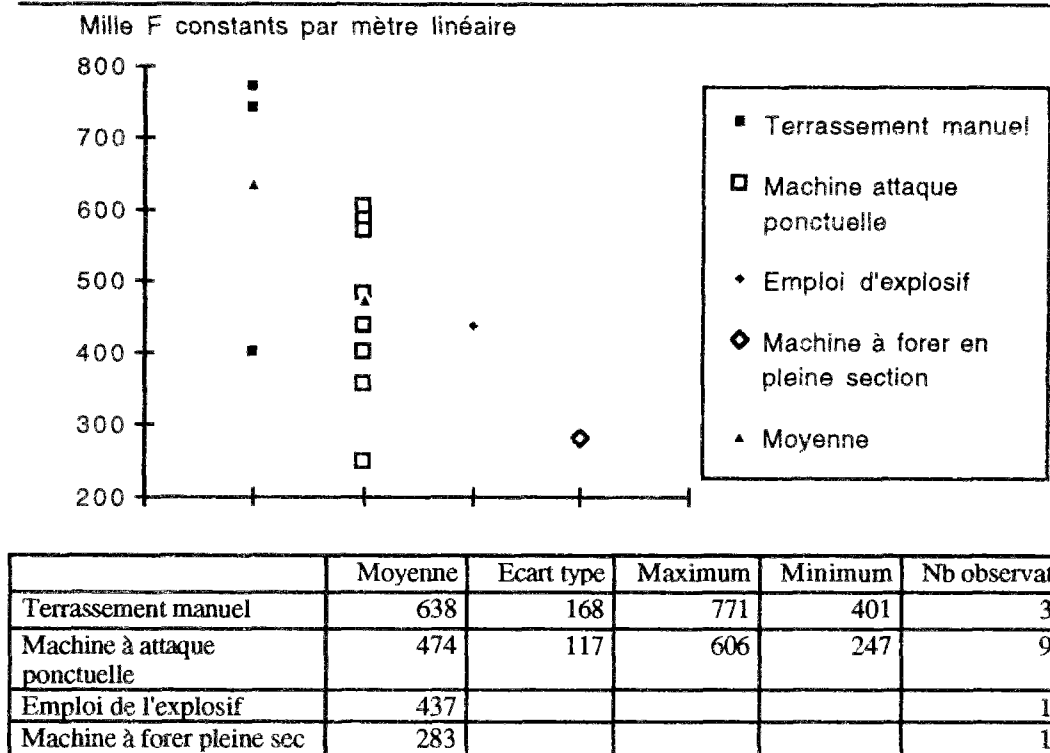
On constate sur la figure que:

- Le traitement à l'avancement en alternance avec le creusement est le plus coûteux;
- Le traitement à l'avancement à partir d'une galerie pilote est moyennement coûteux;
- Le traitement depuis la surface est le moins coûteux.

Incidence des méthodes d'exécution

La figure V.9. examine 4 méthodes d'exécution des travaux.

Fig. V.9 - Coûts hors équipements classés en fonction de méthodes d'exécution



L'examen de la figure V.9 nous explique que le coût baisse avec le niveau de mécanisation:

- La méthode d'exécution manuelle coûte très cher (ce sont des ouvrages de moins de 200 mètre);
- La machine à attaque ponctuelle est beaucoup utilisée, car moins onéreuse que la méthode manuelle;
- La machine à forer en pleine section est moins onéreuse que les autres.

L'analyse précédente montre que les facteurs quantitatifs (volume de béton, la section terrassée) et les facteurs qualitatifs (méthode d'exécution des travaux, méthode de traitement de terrain) sont tous importants et significatifs pour les coûts. Il est nécessaire de les analyser dans leur ensemble avec des méthodes compliquées.

V.2.2. L'analyse par la régression multiple

On a constaté que les coûts des constructions des tunnels sont influencés par des facteurs quantitatifs et qualitatifs. Les résultats des calculs par la régression multiple sont présentés dans la tableau V.2.

Le tableau V.2 nous présente 3 équations (voir annexe V.E). La première a été obtenue avec l'ensemble de 14 observations et 12 variables. Le R^2 est 0,99. La deuxième équation a été faite en éliminant 3 variables non significatives, son R^2 est 0,98. Pour 14 observations, une équation de 9 variables apparaît longue, donc la troisième équation a été réalisée en éliminant 6 variables et 1 observation, son R^2 est 0,75.

Les variables éliminées sont: Année, immersion et terrassement manuel.

Les 3 équations nous donnent les renseignements suivants:

- Les facteurs expliquent assez bien les coûts des ouvrages en ligne de métro régional sont: Longueur, ouverture, section terrassée, volume de structure, profondeur, condition géologique méthode de terrassement et de soutènement.
- Le nombre d'observations n'est pas suffisamment important pour établir une tendance d'évolution des coûts. En réalité, la baisse des coûts se manifeste (dans la première équation) , mais est peu significative sur le plan statistique.
- L'incidence importante de la section terrassé dans la troisième équation s'explique par le fait que les ouvrages du métro régional ont de forte section et correspondent à de faibles longueurs et avec des conditions d'exécution particulièrement difficiles.

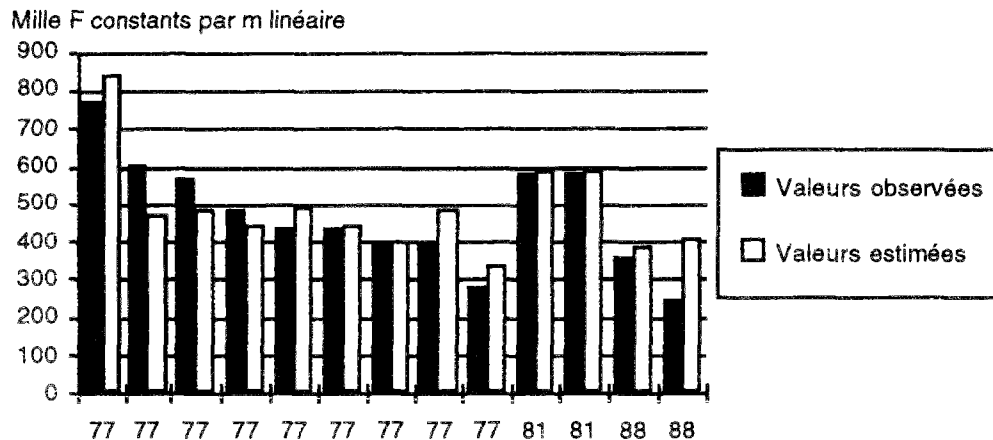
Tableau V.2 - Métro régional - Exécution en souterrain

Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives
Coût de tunnel (Mille F constants/ml)

Variables explicatives													Nb		
Variable Expliquée	Lg	An	Ov	St	Vs	Pf	Hi	Gb	Mp	Mf	Tm	Pr	Cons- tante	R2	d'ob- serva- tion
Coût de tunnel - Métro régional - Exécution en souterrain (12 Variables)															
Mille F	1,12 (3,3)	-2,08 (-0,3)	66,65 (2,7)	-6,49 (-1,6)	9,84 (1,6)	-50,82 (-3,4)	16,67 (1,5)	199,08 (1,4)	-315,98 (-1,5)	-2196,3 (-3,2)	162,66 (0,9)	-815,9 (-3,2)	747,6 (1,4)	14	0,99
Coût de tunnel - Métro régional - Exécution en souterrain (9 variables, t > 95%)															
Mille F	1,35 (6,7)	87,88 (5,6)	-6,99 (-2,5)	11,59 (2,7)	-63,17 (-7,9)	303,46 (4,6)	-502,45 (-7,2)	-2759,6 (-7,6)	-964,6 (-6,2)	780,6 (2,9)	14	0,98			
Coût de tunnel - Métro régional - Exécution en souterrain (3 variables, t > 95%)															
Mille F	7,51 (3,4)	-8,84 (-2,0)	16,63 (2,2)	-225,8 (-1,0)	13	0,75									
Notes:															
An: Années de construction;					Pf: Profondeur du rail par rapport au sol naturel (m);					Pr: Prévoûte;					
Lg: Longueurs (m);					Hi: Hauteur immergée (m);					Mp: Machine à attaque ponctuelle;					
Ov: Ouverture intérieure (m)					Gb: Géologie (bonne);					Mf: Machine à forer en pleine section;					
St: Section tassée(m2)										Tm: Terrassement manuel;					
Vs: Volume de structure (m3/ml);															

Une comparaison des valeurs observées et calculées selon l'équation de 3 variables a été faite et présentée dans la figure V.10.

Fig V.10- Comparaison des valeurs observées et calculées par le modèle de 3 variables



L'analyse par la régression multiple nous permet d'expliquer les coûts et de trouver les facteurs déterminants. Cependant, les échantillons sont assez réduits. L'arrivée de nouveaux ouvrages pourrait changer les résultats.

V.3 - Conclusion

L'analyse de 14 ouvrages pendant une période de 11 ans nous a fourni la situation des coûts des tunnels de métro régional exécutés en souterrain. Elle a mis en évidence les rapports entre les coûts et les caractéristiques des tunnels ainsi que les coûts en fonction de différents facteurs.

A cause de nombre insuffisance d'échantillons, les résultats pourront se préciser, avec l'arrivée de nouveaux ouvrages.

CHAPITRE VI

L'ANALYSE DE L'ENSEMBLE DES COUTS DE TUNNELS

Ce chapitre constitue un complément aux chapitres III, IV et V. On a constaté qu'il existe beaucoup de facteurs en commun pour les tunnels métros urbains et régionaux exécutés en souterrains (méthodes de terrassement, de traitement de terrain etc.). Pour cela, on distingue dans ce chapitre deux ensembles: un ensemble des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain, un ensemble de 89 observations (tunnels métros urbains et régionaux, exécutés en tranchée couverte et en souterrains tous confondus). Les données de base sont les mêmes que pour les chapitres précédents. Etant donnée que les coûts ont été étudiée dans les chapitres précédents, on passe ici directement à l'analyse des facteurs.

VI.1- La présentation des facteurs

L'étude des coûts des tunnels des métros français est basée sur 89 observations, chacune représente un coût d'un ouvrage en ligne, appelé "variable dépendante à expliquer". Une variable dépendante est conditionnée par plusieurs variables indépendantes, appelée "variable explicative", par exemple: année de construction, volume de structure etc.

Les variables explicatives de 89 observations sont regroupées en 3 familles qui sont les suivantes:

- Variables communes à tous les types d'ouvrages.
- Variables spécifiques aux tranchées couvertes.
- Variables spécifiques aux souterrains.

Liste des variables prises en compte dans les analyses:

Variables communes à tous les types d'ouvrages:

An: Année de construction

Lg: Longueurs (m)

Lc: Localisation:

- Pa: Paris

- Pv: Province

Ov: Ouverture intérieure (m)

St: Section terrassée(m2)

Vs: Volume de structure mise en place (m3/ml)

Pf: Profondeur du rail par rapport au sol naturel (m)

Hi: Hauteur immergée (m)

Ub: Urbanisation: - Cv: Centre ville; - Pu: Périphérie urbaine

Cg: Conditions géologiques

- Gb: Géologie (bonne cohésion ou rocheux)

- Gf: Géologie (faible ou sans cohésion)

Variables spécifiques aux tranchées couvertes:

Tc: Tranchée couverte - métros urbains

Mt: Méthodes de terrassements

- Co: Ciel ouvert; - Sd: Sous dalle

Tp: Type de blindage périphérique

- Bl: Berlinoises

- Pm: Paroi moulée

- Pp: Paroi préfabriquée

- Pc: Palplanches

- Ft: Fouille talutée

So: Méthodes de soutènement

- Ss: Sans soutènement; - Bt: Butons

Me: Mesures prises vis à vis de la présence de l'eau

- Ir: Injection radier
- Po: Pompage
- Ri: Rideau d'injection périphérique

Variables spécifiques aux souterrains:

Su: Souterrain - métros urbains

Sr: Souterrain - métro régional

Tr: Méthodes de terrassement

- Mp: Machine à attaque ponctuelle
- Mf: Machine à forer en pleine section
- Tm: Terrassement manuel

Ms: Méthodes de soutènement

- Ci: Cintre+planches de blindage
- Pr: Pré-voûte

Tt: Traitement de terrain

- Pt: Pas de traitement
- Ts: Traitement depuis la surface
- Tf: Traitement à partir du front de taille
- Tg: Traitement à partir d'une galerie de pilote

N1: Niveau de technicité 1 (correspondant: Mp, Mf, Pt, Ts)

N2: Niveau de technicité 2 (correspondant: Tm, Pt, Mf)

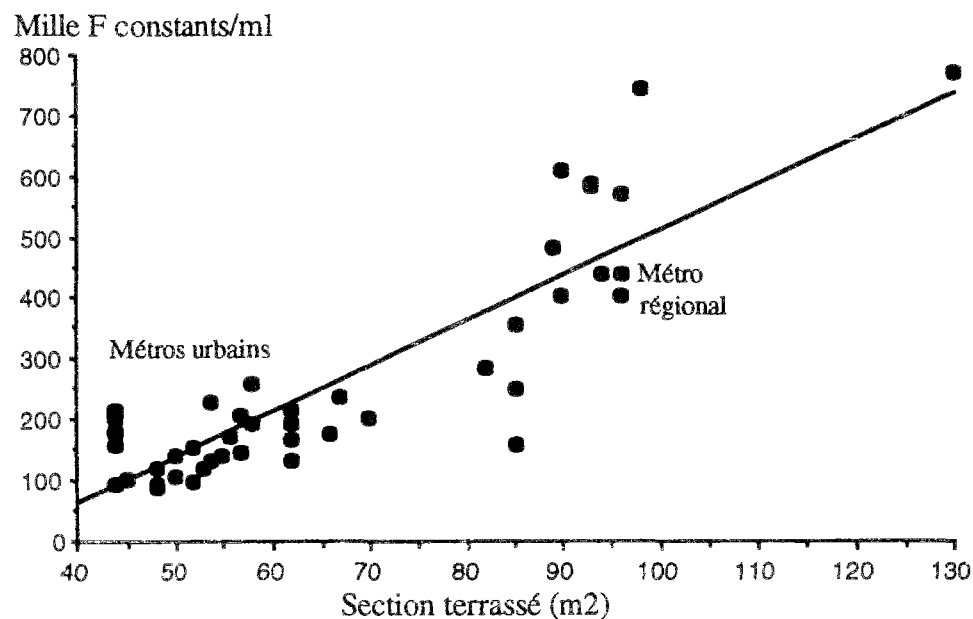
N3: Niveau de technicité 3 (correspondant: Pt, Ts, Tg, Tm, section divisé)

VI.2 - L'analyse des facteurs pris isolément

Il est clair que le coût d'un tunnel est conditionné par plusieurs facteurs. L'analyse des facteurs pris isolément a été faite, mais elle donne peu d'informations intéressantes qui sont les suivantes:

Une incidence de la section terrassée (m2)

Fig. VI.1 - Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain en fonction de la section terrassée(m2)



La figure VI.1 montre la relation entre le coût et la section terrassée (m2) pour les tunnels réalisés en souterrain. Il apparaît que ce facteur joue de façon importante sur le coût. De plus, la bonne valeur de la corrélation ($R^2=0,76$) démontre que la relation est significative.

La formule issue de la régression simple est la suivante:

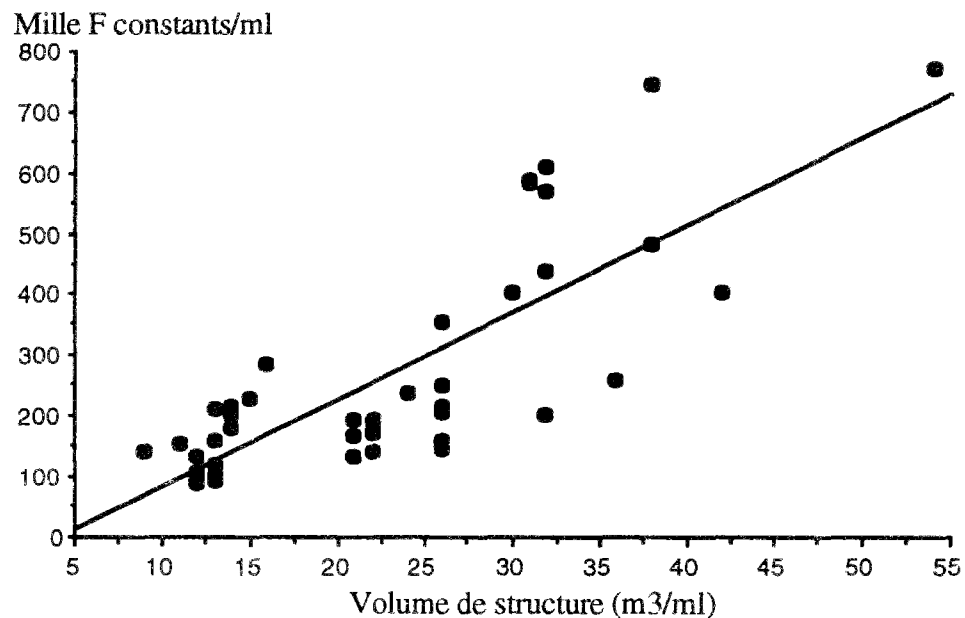
$$C = -231,20 + 7,45 \times \text{Section terrassée (m2)}$$

(-5,2) (11,7)

La figure VI.1 fait cependant apparaître deux familles d'ouvrages bien distinctes. La formule correspondante est donc à utiliser avec la plus grande prudence.

Une incidence du volume de structure en béton (m3)

Fig.VI.2 - Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain en fonction du volume de structure



La figure VI.2 montre quant à elle la relation entre le coût et le volume de structure mise en place (m3/ml), toujours pour les ouvrages réalisés en souterrain. Ce facteur constitue également un élément déterminant du coût. Bien que la corrélation soit moins bonne que pour la section terrassée ($R^2=0,65$), la répartition des valeurs est plus homogène.

La formule issue de la régression simple est la suivante:

$$C = -60,44 + 14,37 \times \text{Volume de structure (m3/ml)}$$

(-1,5) (8,9)

Les figures VI 1 et 2 montrent bien la relation des coûts et le volume de structure et la section terrassée. Elles donnent une piste de la réduction des

coûts. Cela nous suggère que l'évolution des coûts pourrait trouver son origine dans la diminution du volume de structure et la section. Cette supposition sera confirmée dans le chapitre VIII - les causes de l'évolution des coûts.

L'analyse des autres facteurs pris individuellement n'a pas donné de résultats satisfaisants. Cela n'a rien d'étonnant, car la formulation des coûts des tunnels est complexe. Aussi convient-il de combiner plusieurs facteurs quantitatifs et qualitatifs et de les analyser par la méthode de la régression multiple.

VI.3 - L'analyse de l'ensemble des coûts de tunnels réalisés en souterrain

VI.3.1 - L'analyse avec des variables diverses

L'analyse par la régression de l'ensemble des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain a été faite et les résultats sont présentés dans le tableau VI.1 (voir annexe VI.A).

Dans la première équation, on trouve 22 variables, le R^2 est 0,94. Mais il y a beaucoup de variables dont les valeurs t sont inférieures. La deuxième équation (avec 9 variables, $R^2 = 0,92$) a été réalisée en éliminant les 13 variables suivantes:

Tableau VI.1 - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain
Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives
Coût des tunnels (Mille F constants/ml)

Variable		Variables explicatives																						Nb	
Expliquée	Lg	An	Ov	St	Vs	Pf	Hi	Cv	Pu	Sr	Pa	Gb	Gf	Mp	Mf	Tm	Ci	Pr	Pt	Ts	Tf	Tg	Cons- tante	R2	
Coût de tunnel - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain (22 variables)																									
Mille F	-0,001	-9,69	-17,61	1,77	3,25	-6,46	5,09	-117,72	-164,18	172,61	-15,39	-15,09	-18,54	21,34	78,03	-26,54	100,21	111,34	-24,57	-27,36	112,16	-7,94	1070,20	45	0,94
	(-0,2)	(-2,2)	(-1,9)	(0,9)	(1,2)	(-1,9)	(1,7)	(-1,3)	(-1,7)	(2,6)	(-0,4)	(-0,3)	(-0,3)	(0,4)	(1,1)	(-0,4)	(1,9)	(2,1)	(-0,4)	(-0,6)	(1,9)	(-0,1)	(2,3)		
Coût de tunnel - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain (9 variables, t > 95%)																									
Mille F	-5,30				4,69	-7,21	5,32		-46,11	196,14							44,39	80,29			106,12		559,79	45	0,92
	(-2,1)				(3,1)	(-2,9)	(3,1)		(-2,0)	(6,1)							(1,9)	(2,2)			(3,6)		(2,4)		
Coût de tunnel - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain (3 variables, t > 95%)																									
Mille F					7,57				-40,37	208													49,38	43	0,88
					(5,8)				(-1,8)	(6,4)													(1,9)		
Notes:																									
An: Année de construction;	Pf: Profondeur du rail par rapport														Gf: Géologie (faible);										
Lg: Longueurs (m);	au sol naturel (m);														Sr: Souterrain - métro régional;										
Pa: Paris;	Hi: Hauteur immergée (m);														Mp: Machine à attaque ponctuelle;										
Ov: Ouverture intérieure (m);	Cv: Centre ville;														Mf: Machine à forer en pleine section;										
St: Section tassée(m2);	Pu: Périphérie urbaine;														Tm: Terrassement manuel;										
Vs: Volume de structure (m3/ml);	Gb: Géologie (bonne);														Ci: Cintre+planches de blindage;										
	Pr: Prévoûte;														Ts: Traitement depuis la surface										
	Pt: Pas de traitement;														Tf: Traitement à partir du front de taille										
															Tg: Traitement à partir d'une galerie de pilote										

<u>Variables éliminées</u>	<u>R²</u>
Lg: Longueurs (m);	0,942
Gb: Géologie (bonne);	0,942
Gf: Géologie (faible);	0,942
Tm: Terrassement manuel;	0,942
Tg: Traitement à partir d'une galerie de pilote.	0,942
Pa: Paris	0,941
Pt: Pas de traitement;	0,940
St: Section terrassée(m2)	0,939
Ts: Traitement depuis la surface	0,936
Mp: Machine à attaque ponctuelle;	0,932
Mf: Machine à forer en pleine section;	0,930
Ov: Ouverture intérieure (m)	0,929
CV: Centre ville;	0,927

Les 13 variables dont les valeurs t sont inférieurs ont été éliminées, le R² a diminué seulement 0,019, passant de 0,942 à 0,923. Les 9 variables apparaissent être nombreuses, donc la troisième équation simplifiée et améliorée a été mis au point avec 3 variables. Il regroupe la totalité des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain. Le R² est 0,88.

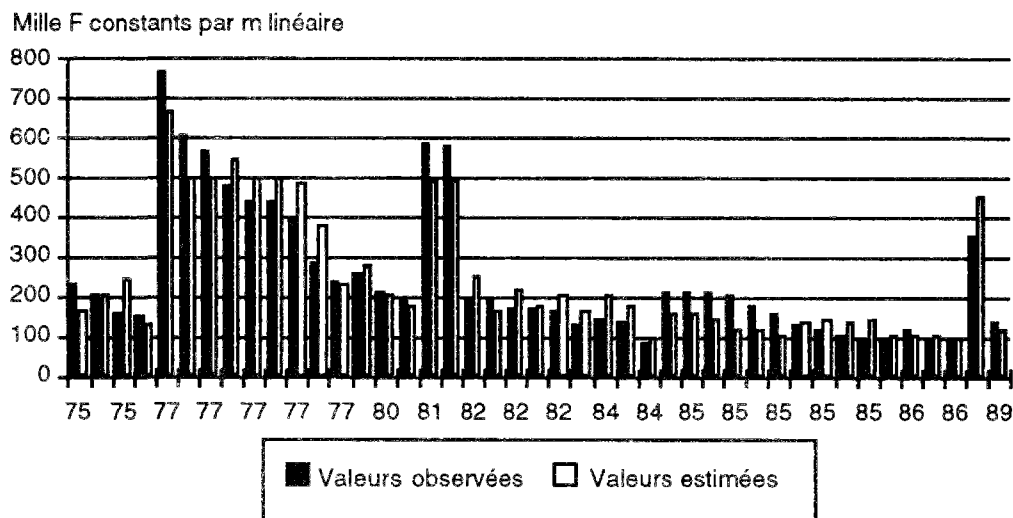
Les 3 équations du tableau VI.1 nous fournissent les renseignements suivants:

- Les variables significatives constatées dans les chapitres précédents sont retrouvées, elles sont: Année de construction, volume de structure (m3), profondeur (m), présence de l'eau, urbanisation, méthodes de traitement de terrain et d'exécution.
- Le type de réseau est un facteur important. Le Sr= 1 pour le métro régional (+ 208,03) et 0 pour tunnels de métros urbains.

- La troisième équation retrouve les facteurs importants, mais de façon beaucoup plus simple. Le facteur temps n'apparaît plus comme significatif, cela tient au nombre limité des observations concernant le métro régional.
- L'analyse de l'ensemble des ouvrages en ligne de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain donne un bon résultat (R^2 est élevé). Intrinsèquement, ce sont des tunnels exécutés avec les mêmes méthodes malgré la différence des réseaux.

Une comparaison des valeurs observées et calculées avec le modèle de 3 variables a été faite (fig VI.3).

Fig.VI.3 - Comparaison des coûts observés et calculés avec modèle de 3 variables



VI.3.2 - L'étude par niveaux de technicité

Toujours pour la famille des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain, une autre recherche a été réalisée sur la base des niveaux de technicité. Il s'agit de classer les variables qualitatives influençant les coûts en fonction des niveaux de technicité tels qu'ils apparaissent dans la figure VI.4.

Fig.VI.4 - Tunnels exécutés en souterrain- Détermination des niveaux de technicité

DIVISION DE SECTION:	PLEINE SECTION OU DEMI SECTION SUPERIEURE			SECTION DIVISÉE		
TRAITEMENTS:	Pas de traitement	Traitement depuis la surface	Avancement ou galerie	Pas de traitement	Traitement depuis la surface	Avancement ou galerie
TERRASSEMENT MECANISE:	1 ER NIVEAU		3 EME NIVEU	2 EME NIVEAU		3 EME NIVEAU
TERRASSEMENT NON MÉCANISÉ:	2 EME NIVEAU	3 EME NIVEAU		3 EME NIVEAU		

Cette figure à double entrée fait apparaître:

- en colonnes, 2 classes de mode d'attaque: pleine section et pleine demi-section supérieure d'une part, section divisée d'autre par. Pour chaque mode d'attaque trois modes de traitement des terrains (l'absence de traitement, le traitement depuis la surface et le traitement à partir d'un ouvrage en sous-sol).

-en lignes, deux modes de terrassement: mécanisé (tunnelier ou machine à attaque ponctuelle) et non mécanisé(l'emploi d'outils manuels ou portatifs). Le mode de soutènement n'a pas paru suffisamment significatif pour être pris en compte.

L'analyse statistique montre que les tunnels de premier niveau de technicité sont les moins onéreux, et ceux du troisième sont les plus onéreux. Mais on ne peut pas évaluer le coût selon le niveau de technicité uniquement.

Le classement des coûts par les niveaux de technicité fournit une approche intéressante, mais insuffisante. Il met en évidence l'importance des facteurs qualitatifs (méthodes), cependant, les facteurs quantitatifs (volume, section) n'y sont pas comptés. Or ils sont aussi importants. Donc l'intégration des

niveaux de technicité dans le calcul par la régression multiple avec les facteurs quantitatifs (volume, section etc.) a été faite, trois formules ont été établies et sont présentées dans le tableau VI.2 (voir annexe VI.B).

Le tableau VI.2 présente 3 équations. La première a été faite avec l'ensemble de 17 variables. La corrélation est bonne ($R^2=0,92$), mais la valeur t n'est pas élevée pour la plupart des variables. La deuxième équation a été obtenue en éliminant les variables suivantes:

<u>Variables éliminées</u>	<u>R²</u>
Pa: Paris	0,916
Gb: Géologie (bonne);	0,916
N2: Niveau de technicité 2	0,916
An: Années de construction;	0,914
Cv: Centre ville;	0,914
Ov: Ouverture intérieure (m)	0,911
St: Section terrassée(m ²)	0,909
Gf: Géologie (faible);	0,906
Lg: Longueurs (m);	0,901
Ci: Cintre+planches de blindage;	0,901
Pu: Périphérie urbaine;	0,899
Pr: Prévoûte;	0,895

La troisième équation (avec 5 variables aussi) concerne uniquement les tunnels de métros urbains exécutés en souterrain (29 observations).

Les résultats d'analyse par la régression nous montrent:

- Les facteurs pris en compte sont: section terrassée, volume de structure, urbanisation, profondeur, immersion dans l'eau, niveaux de technicité et le type de réseau.

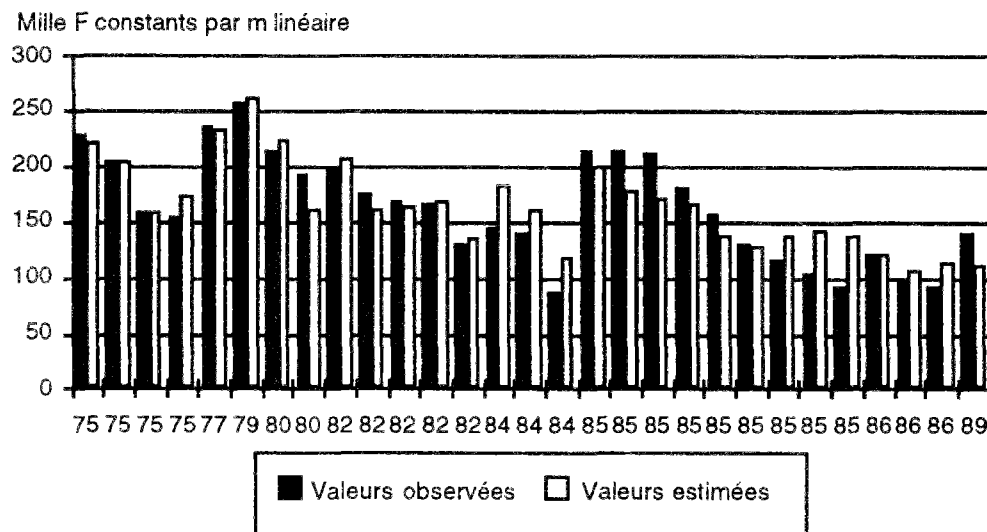
Tableau VI.2 - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain
Coefficients des équations de régression expliquant le coût par les niveaux de technicité
Coût de tunnel (Mille F constants/ml)

Variable Expliquée	Variables explicatives																Nb Cons- tante	serva- nte	R2		
Lg	An	Ov	St	Vs	Pf	Hi	Cv	Pu	Sr	Pa	Gb	Gf	Ci	Pr	N3	N2					
Coût de tunnel - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain (17 variables)																					
Mille F	0,03	-2,01	-10,39	1,65	5,07	-5,92	5,74	-54,88	-63,78	175,27	-1,25	-4,89	-35,4	37,1	66,27	65,84	5,99	273,96	45	0,92	
	(1,3)	(-0,4)	(-1,0)	(0,9)	(1,9)	(-1,9)	(2,0)	(-0,7)	(-0,8)	(2,7)	(-0,0)	(-0,1)	(-0,6)	(1,0)	(1,4)	(1,5)	(0,2)	(0,6)			
Coût de tunnel - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain (5 variables, t > 95%)																					
Mille F					6,04	-5,88	5,68			188,65						84,33		81,28	45	0,88	
					(4,2)	(-2,6)	(3,2)			(5,9)						(2,9)		(1,7)			
Coût de tunnel - Métros urbains - Exécution en souterrain (5 variables, t > 95%)																					
Mille F			-4,18		8,4				-53,6								59,99	29,64	256,71	29	0,80
			(-5,4)		(7,7)				(-4,9)								(3,9)	(2,4)	(8,1)		
Notes:																					
An:	Année de construction;										Pf: Profondeur du rail par rapport					Pr: Prévoûte;					
Lg:	Longueurs (m);										au sol naturel (m);					Ci: Cintre+planches de blindage;					
Pa:	Paris;										Hi: Hauteur immergée (m);					Sr: Souterrain - métro régional;					
Ov:	Ouverture intérieure (m);										Cv: Centre ville;					N2: Niveau de technicité 2 (correspondant: Tm, Pt, Mf)					
St:	Section terrassée(m2);										Pu: Périphérie urbaine;					N3: Niveau de technicité 3 (correspondant: Pt, Ts, Tg, Tm,					
Vs:	Volume de structure (m3/ml);										Gb: Géologie (bonne);					Tf,section divisée).					
											Gf: Géologie (faible);										

- Le coût de tunnel est le plus élevé pour le troisième niveau de technicité et le plus faible pour le première niveau.
- Les équations démontrent l'importance des facteurs pris en compte. La corrélation entre les coûts et ces facteurs est forte. Il est clair que ces résultats sont influencés par les échantillons de métro régional.
- Il donne l'importance des facteurs qualitatifs.
- La baisse du coût dans le temps existe, mais la valeur t calculée du temps n'est pas tellement significative.

La figure VI.5 donne une comparaison des coûts observés et calculés selon la troisième équation qui montre que les coûts sont bien reproduits.

Fig.VI.5 - Comparaison des coûts observés et calculés



Les analyses faites avec les niveaux de technicité constituent une approche significative en intégrant les méthodes d'exécution des travaux et les méthodes de traitement de terrain. Ils sont valables du point de vue statistique, les facteurs significatifs trouvés dans les chapitres précédents sont

retrouvés en générale tel que la section terrassée, le volume de structure, l'urbanisme et les méthodes d'exécution des travaux.

VI.3.3 - L'étude des cas

Une comparaison a été faite entre les coûts officiellement prévus pour réaliser le tunnel de Météor (Métro Est-Ouest Rapide) et le tunnel de la ligne D du RER à Paris et ceux calculés par les modèles du présent chapitre. (Les coûts sont en Francs constants par mètre linéaire au 1 janvier 1993) Les prix sont corrigés avec une formule de révision inspirée de celle en vigueur pour les marchés Publics de Travaux. Bien sûr, il s'agit toujours des coûts hors équipements.

Le tunnel de la ligne Météor a 4191 m à 2 voies de 15 à 25 m de profondeur dans la nappe, exécuté en pleine section par une machine à forer à confinement. Son diamètre extradossal : 8,30 m. La section terrassée: 54,106 m²; Le volume de structure en béton: 9,935 m³ par ml.

L'ouvrage ligne D est la jonction centrale (lot D2) entre Châtelet-les-Halles et Gare de Lyon qui comporte 2 tunnels à 1 voie (tunnel V1: 1630 m, V2:1585) ramenés à 2 voies de 1608 m. Sa profondeur: 25 m dans la nappe; Son diamètre intérieur: 6,3 m; extérieur: 7,1 m; La section terrassée: 39,592 m². Le volume de structure en béton(m³): 16,835.

Les résultats de calcul des coûts sont présentés dans le tableau VI.3.

Tableau.VI.3 - Comparaison des coûts prévus et des coûts calculés par les modèles

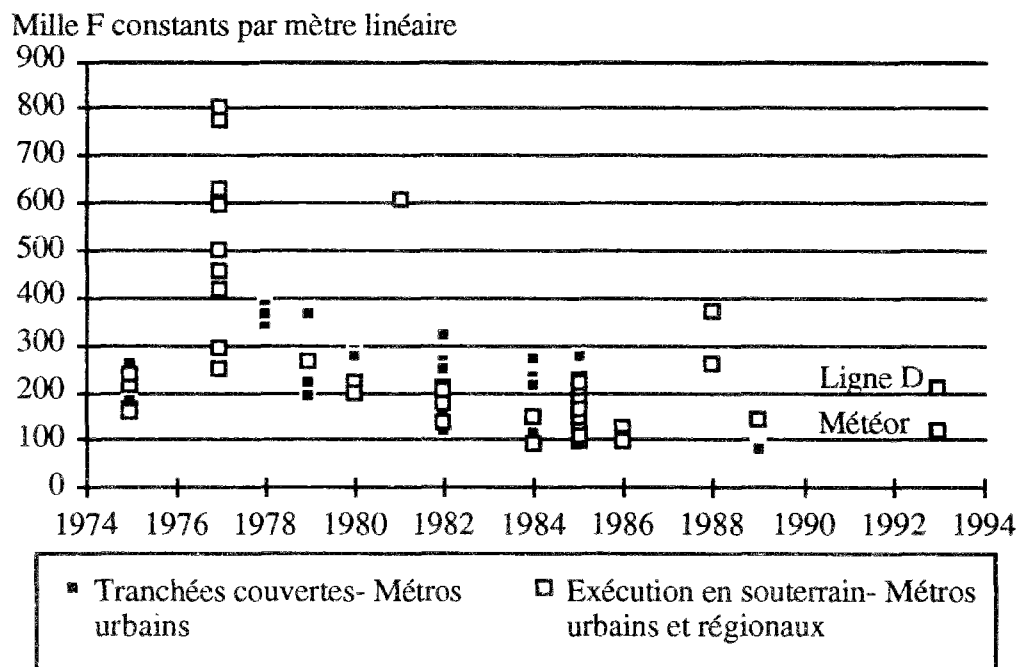
	Météor	Ligne D
Coûts prévus des contrats	117,355	207,20
Coûts calculés par:		
Modèle de 3 variables	129,563 (110,4%)	183,878 (88,7%)
Modèle de 5 variables	118,741 (101,2%)	242,035 (116,8%)

Note: Les valeurs en % entre parenthèses dans ce tableau sont les résultats de comparaison avec les coûts prévus par les contrats. Les coûts prévus par les modèles ont été ramenés au mois de janvier 1993.

Les résultats sont encourageants. Ils montrent que les modèles construits à partir des observations statistiques sont acceptables sur ces deux exemples.

Pour comparer les coûts de Météor et de la ligne D avec les coûts des tunnels construits, une distribution récapitulative des coûts a été faite.

Fig.VI.6 - Coûts hors équipements des tunnels de métros urbains et régionaux- Distribution récapitulative- Situation de Météor et la ligne D



La figure VI.6 nous fournit les renseignements suivants:

- Les coûts de tunnels de Météor et la ligne D se trouvent dans le courant de l'évolution. Les coûts des tunnels se stabilisent.
- Les coûts de tunnels Météor et de la ligne D sont parmi les coûts inférieurs.
- Les coûts semblent bien maîtrisés actuellement parce qu'ils sont moins dispersés.

En effet, les travaux de tunnels Météor et ligne D sont en cours, une augmentation de quelque % du coût sera possible. Néanmoins, ils constituent une référence importante.

L'introduction de niveaux de technicité dans l'analyse a amélioré les résultats; ce qui prouve l'importance des méthodes d'exécution sur les coûts.

VI.4 - L'analyse de l'ensemble de 89 observations

L'analyse de l'ensemble de 89 observations (tunnels de métros urbains et régionaux, exécution en tranchée couverte et en souterrain) par la régression a été faite et les résultats sont présentés dans le tableau VI.4.

Ce tableau nous donne les renseignements suivants:

1. En ce qui concerne l'ensemble de 89 observations, de 34 variables explicatives, on obtient R^2 : 0,87. Mais les valeurs de t ne sont pas élevées pour la plupart des variables (voir annexe VI.C). Les variables dont les valeurs de t ont un seuil significatif de moins de 95 % ont été ainsi éliminées une par une tout en constatant la valeur de t; chaque fois, c'est la variable qui a la minimale de la valeur t a été éliminée. Au fur et à mesure de l'élimination des variables, la valeurs R^2 diminue, On obtient finalement une équation de 13 variables avec le $R^2=0,87$, (voir la deuxième équation du tableau VI.4). Par rapport à la première équation, il y a une réduction de 21 variables, le R^2 a diminué uniquement de 0,021. Les variables éliminées et l'évolution de R^2 sont les suivantes:

Tableau VI.4 - Ensemble des métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain et en tranchée couverte
Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives
Coût de tunnel (mille F constants)

Variable	Variables explicatives																												Nb																				
Expliquée	Lg	An	Ov	St	Vs	Pf	Hi	Cv	Pu	Su	Tc	Pa	Gb	Gf	Co	Ss	Bt	Pc	Bl	Pm	Pp	Ir	Po	Ri	Fi	Mp	Mf	Tm	Ci	Pr	Pt	Ts	Tf	Tg	Cons- d'ob-	R2													
Coût de tunnel - l'ensemble (34 variables)																														taite serva-																			
Mille F	0	-4,99	-0,39	0,14	4,26	-6,58	2,28	-6,03	-14,24	-253,86	-185,24	-46,58	-75,7	-74,6	-76,27	21,0	110,2	-174,5	-73,82	-137,1	-81,0	1,1	45,28	13,97	16,3	26,8	-24,33	70,6	-29,95	21,99	-33,63	2,49	88,56	15,0	931,23	89	0,87												
	0	(-1,5)	(-0,1)	(0,2)	(2,0)	(-2,0)	(1,8)	(-0,1)	(-0,3)	(-5,8)	(-1,5)	(-1,3)	(-2,4)	(-2,2)	(-1,9)	(0,3)	(2,5)	(-1,4)	(-0,9)	(-1,5)	(0,9)	(0,02)	(1,0)	(0,2)	(0,1)	(0,5)	(-0,4)	(1,0)	(-0,7)	(0,4)	(-0,6)	(0,1)	(1,5)	(0,2)	(2,8)														
Coût de tunnel - L'ensemble (13 variables, t > 95 %)																																																	
Mille F	-7,24	4,73	-7,78							-275,39	-260,85	-74,20	-65,5	-53,1	-69,19	91,89				-56,89																													
	(-3,4)	(3,3)	(-4,0)							(-9,8)	(-5,1)	(-3,7)	(-2,8)	(-2,3)	(-2,3)	(3,4)				(-2,1)																													
Notes:																																																	
Facteurs communs à tous les types d'ouvrages:																														Facteurs spécifiques aux tranchées couvertes :										Facteurs spécifiques aux souterrains :									
An: Années de construction;																														Tc: Tranchée couverte;										Su: Souterrain - métros urbains;									
Lg: Longueurs (m);																														Co: Ciel ouvert;										Mp: Machine à attaque ponctuelle;									
Pa: Paris;																														Bl: Berlinnoises;										Mf: Machine à forer en pleine section;									
Ov: Ouverture intérieure (m);																														Pm: Paroi moulée;										Tm: Terrassement manuel;									
St: Section terrassée(m2);																														Pp: Paroi préfabriquée;										Ci: Cintre+planches de blindage;									
Vs: Volume de structure (m3/ml);																														Pc: Paleplanche;										Pr: Prévoûle;									
Pf: Profondeur du rail par rapport au sol naturel (m);																														Ss: Sans soutènement;										Pt: Pas de traitement;									
Hi: Hauteur immergée (m);																														Bt: Butons;										Ts: Traitement depuis la surface;									
Cv: Centre ville;																														Ir: Injection radier;										Tf: Traitement à partir du front de taille									
Pu: Périphérie urbaine;																														Po: Pompage;										Tg: Traitement à partir d'une galerie de pilote.									
Gb: Géologie (bonne);																														Ri: Rideau d'injection périphérique;																			
Gf: Géologie (faible);																														Ft: Fouille talutée.																			

- Le R^2 est 0,874 au initiale avec 34 variables.

<u>Variables éliminées</u>	R^2
Ir: Injection radier;	0,874
Ts: Traitement depuis la surface	0,874
Ss: Sans soutènement;	0,873
Ri: Rideau d'injection périphérique;	0,873
Ft: Fouille talutée	0,873
Tg: Traitement à partir d'une galerie de pilote.	0,873
Cv: Centre ville;	0,872
Pr: Pré-voûte;	0,872
Lg: Longueurs (m);	0,871
Ov: Ouverture intérieure (m)	0,871
St: Section terrassée(m2)	0,871
Pu: Périphérie urbaine;	0,871
Mp: Machine à attaque ponctuelle;	0,871
Po: Pompage;	0,868
Hi: Hauteur immergée (m);	0,865
Mf: Machine à forer en pleine section;	0,863
Ci: Cintre+planches de blindage;	0,861
Bl: Berlinoises;	0,858
Pp: Paroi préfabriquée;	0,858
Tm: Terrassement manuel;	0,856
Pc: Palplanche	0,853

Le R^2 est 0,85 avec 13 variables.

2. Finalement, les 13 variables significatives au seuil de 95 % sont repérées.

Elles donnent les renseignements suivants:

Pour les variables communes à tous les types d'ouvrages:

- Une décroissance du coût au cours du temps;
- Une décroissance à la diminution du volume de structure;
- Le tunnel plus profond, moins cher;

- Les conditions géologiques sont significatives. Par rapport à des conditions mauvaises, la géologie bonne représente moins 65,52 F, la géologie faible représente moins 58,08 F.

Pour les variables spécifiques aux tunnels en tranchée couverte:

- Le coût de tunnel métro urbain exécuté en tranchée couverte représente moins 260,85 F par rapport au coût de tunnel métro régional exécuté en souterrain;

- La méthode d'exécution à ciel ouvert est moins onéreuse (- 69,19 F) par rapport à la méthode d'exécution sous dalle pour des tunnels en tranchée couverte;

- La méthode de soutènement par bouton est onéreuse (+91,89 F);

- Le type de blindage périphérique par paroi moulée est moins cher (- 56,89 F)

Pour les variables spécifiques aux souterrains:

- Le coût de tunnel métro urbain exécuté en souterrain est de - 275,39 F par rapport au coût de tunnel métro régional exécuté en souterrain;

- La méthode de soutènement par pré-voûte est cher (+45,09) par rapport aux autres méthodes.

Par expérience, on sait que les variables longueur, section terrassée, urbanisation sont des facteurs importants, mais qui ne sont pas repérées dans le modèle, la raison est due au mélange des types de réseaux et des méthodes d'exécution. Des analyses séparées de 3 types des ouvrages ont été faites et les résultats sont présentés dans les chapitres précédents.

3. Les variables non significatives dans l'analyse de l'ensemble de 89 observations, mais significatives dans les analyses séparées de famille sont les suivantes:

Pour les tunnels réalisés en tranchée couverte:

- Ouverture du tunnel (diamètre intérieur en m);
- Urbanisation, le tunnel se situe au périphérie est moins cher (-52,03 F) par rapport au centre ville;

Pour les tunnels réalisés en souterrain:

- La longueur influence le coût, mais cela est faible (-0,02 par m)
- Section terrassée;
- La présence de l'eau augmente le coût;

Cette contradiction pourrait s'expliquer par les différences de type de réseau et les méthodes de construction. En synthèse, les variables significatives conditionnant les coûts sont les suivantes: Année, longueur, section terrassée, volume de structure, conditions géologiques, méthodes de terrassements, méthodes de traitement de terrain, méthodes de soutènements, urbanisation et le type du réseau.

VI.5 - Conclusion

L'analyse des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain dans leur ensemble a été réalisée et elle constitue un complément des chapitres précédents. La combinaison des observations métros urbains et régionaux dans le traitement donne des bons résultats.

L'introduction de niveaux de technicité dans l'analyse a amélioré les résultats qui prouvent l'importance des méthodes d'exécution sur les coûts.

Les coûts de tunnels Météor et la ligne D constituent un élargissement des données. Leur constatation nous permet de voir l'évolution des coûts jusqu'à nos jours et la fiabilité des modèles en quelque sorte.

L'analyse de l'ensemble de 89 observations constitue une démarche intéressante. Elle augmente le nombre d'observation et par conséquent la fiabilité des résultats qui sont compatibles avec ceux des chapitres précédents.

CHAPITRE VII

L'EVOLUTION DES COUTS DES EQUIPEMENTS

Durant les analyses précédentes, on a constaté que, soit pour les métros urbains ou régionaux, soit pour des méthodes d'exécution, leurs coûts des équipements représentent toujours un faible pourcentage. En générale, et quelque soit le type de tunnel, les équipements sont identiques sauf la voie. C'est pourquoi toutes les données des équipements ont été regroupées ici et les analysées d'une façon globale. les données sont présentées dans l'annexe VII.A. Les prix ont été déflatés selon l'indice PIB 1990.

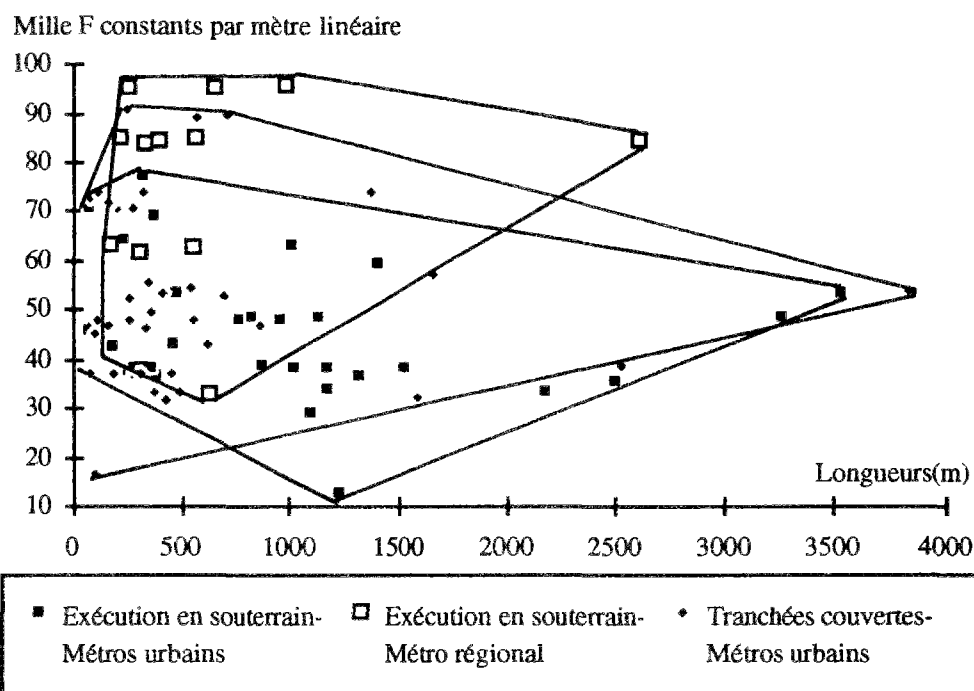
VII.1- L'état et l'évolution des coûts

Les coûts des équipements regroupent les postes de dépense suivants:

- La voie
- Les équipements de ventilation, de climatisation et des épuisements
- Les équipements de courants forts
- Les équipements de courants faibles

La figure VII.1 donne une idée du coût total des équipements par réseaux de transport et par méthodes d'exécution des travaux. Elle montre que les coûts des équipements sont dispersés.

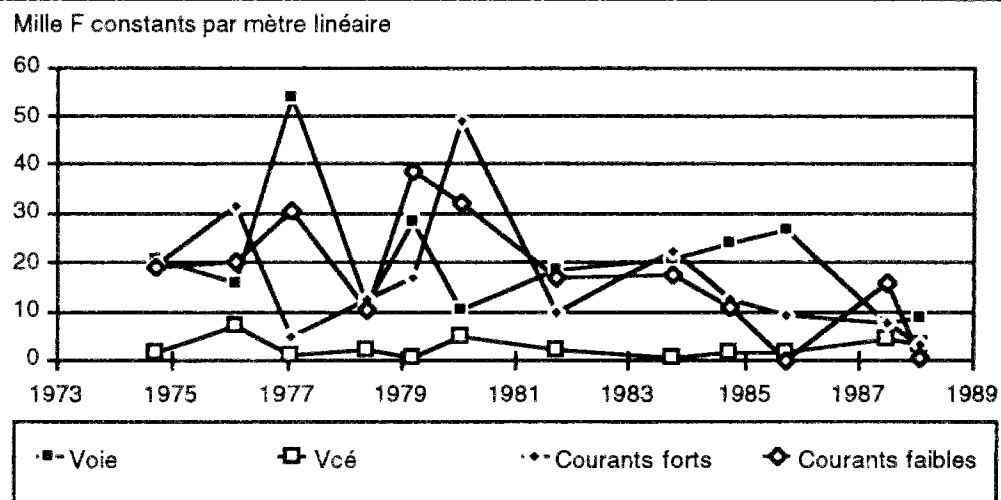
Fig.VII.1 - Coûts totaux des équipements par réseaux de transport



	Moyenne	Ecart type	Maximum	Minimum	Nb observa	Total en m
Exécution en souterrain- Métros urbains	46	14	77	13	32	29561
Tranchées couvertes- Métros urbains	53	18	91	16	43	23747
Exécution en souterrain- Métro Régional	72	21	96	33	14	7600

Une étude en détail a été faite concernant l'évolution des coûts des équipements par poste de dépense dans leur ensemble. Les résultats sont présentés dans la figure VII.2.

Fig.VII.2 - Evolution des coûts des équipements en moyenne par poste



Note: Vcé= ventilation, climatisation et épuisement.

La figure VII.2 donne des constatations suivantes:

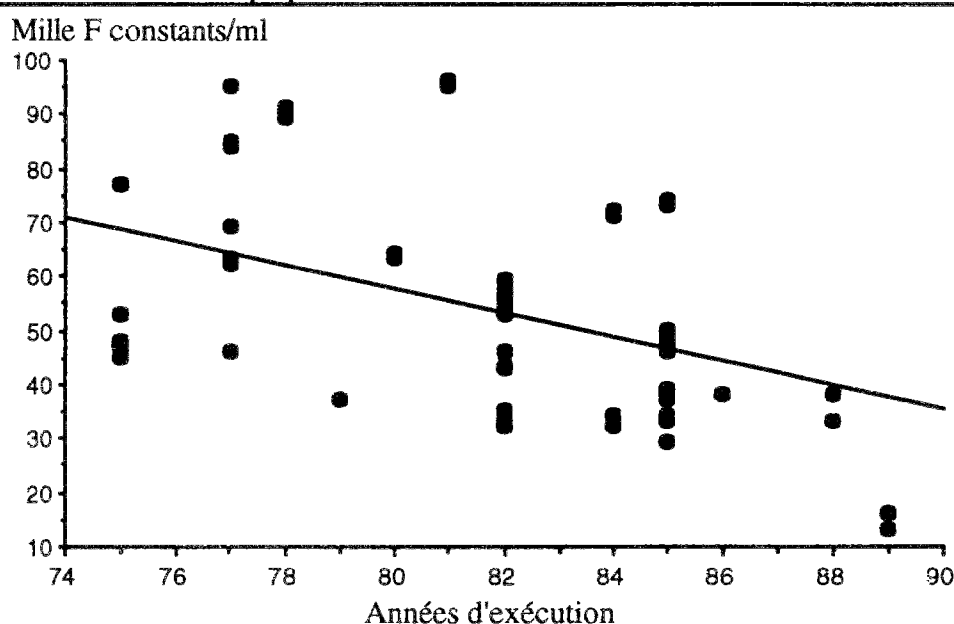
- Les coûts de ventilation, de climatisation et d'épuisements restent inchangé.
- Les coûts des équipements de courants forts et de courants faibles ont diminué.
- Le coût de la voie est marqué par un point haut en 1978 en province. Sauf ce point, on peut dire que le coût de la voie est stable.

Pour mieux voir l'évolution des coûts des équipements, les analyses des facteurs par régression ont été faites et les résultats sont présentés dans la partie suivante.

VII.2- L'analyse des facteurs

Une analyse par année a été faite. Les résultats sont suivants:

Fig.VII.3 - Coûts des équipements en fonction de l'année



La figure issue de la régression est la suivante:

$$C = 233,62 - 2,20 \times \text{Années d'exécution}$$

(5,8) (-4,4)

La figure VII.3 montre que les coûts des équipements a tendance à la baisse.
le R^2 : 0,19 n'est pas nul

Une autre tentative a été faite également en introduisant 4 variables: année, localité (Paris et province), longueur d'ouvrage (m), et type de tunnel (métros urbains ou régionaux, exécutés en souterrain ou en tranchée couverte). Les résultats sont mauvais (voir l'annexe VII.B). Les valeurs calculées de t sont toutes inférieures aux valeurs tabulaires de t sauf année. Cela signifie que les coûts des équipements sont, en général, indépendants de la localité, du type d'ouvrage et de la longueur d'ouvrage. Autrement dit, ces 3 facteurs n'expliquent pas les coûts des équipements.

VII.3 - Conclusion

Ce chapitre a montré l'état et l'évolution des coûts des équipements. Les analyses statistiques donnent peu de renseignements utiles. De toute façon, ce

chapitre constitue un élément complémentaire des chapitres précédents. Toutes les valeurs détaillées concernant les coûts des équipements sont présentés dans les annexes aux chapitres IV, V et VI.

CHAPITRE VIII

LES CAUSES DE L'EVOLUTION DES COUTS

Une des conclusions importantes de cette recherche est que l'on constate une tendance à la baisse des coûts des tunnels. Ce chapitre analyse les causes de cette évolution. En effet, s'il est difficile d'expliquer les causes de cette évolution, il est possible de déterminer quels phénomènes y sont étrangers.

VIII.1 - Les causes sans influence

Pour connaître les influences des salaires, des matériaux de construction et de l'énergie sur l'évolution des coûts, il est fait référence aux index nationaux emplois pour la révision des prix des marchés de travaux publics de 1975 et 1990. La structure de ces index est restée la même depuis 1975, elle est la suivante:

T.P. 02: Travaux en souterrains à faible profondeur en site urbain

$$50 \frac{S(1+K)}{S_0(1+K_0)} + 19 \frac{Mat}{Mat_0} + 2 \frac{GO}{GO_0} + 1 \frac{FOD}{FOD_0} + 3 \frac{Sc}{Sc_0} + 4 \frac{AG}{AG_0} - 8 \frac{Lmc}{Lmc_0} - 3 \frac{Lma}{Lma_0} - 6 \frac{Cm}{Cm_0} + 4 \frac{PsdA}{PsdA_0}$$

T.P. 05: Travaux en souterrains

$$36 \frac{S(1+K)}{S_0(1+K_0)} + 15 \frac{Mat}{Mat_0} + 2 \frac{GO}{GO_0} + 2 \frac{FOD}{FOD_0} + 3 \frac{EL}{EL_0} + 1 \frac{Sc}{Sc_0} + 7 \frac{AG}{AG_0} + 7 \frac{Lma}{Lma_0} - 3 \frac{Lmc}{Lmc_0} - 9 \frac{Cm}{Cm_0} + 15 \frac{PsdA}{PsdA_0}$$

S = Indice élémentaire des salaires des industries du bâtiment et des travaux publics (indice général France entière) publié au Bulletin officiel des services des prix.

Mat = Indice de prix des matériels de travaux publics calculé par la formule $0,30 S (1+K) + 0,70 Lma$.

GO = Prix de l'hectolitre de gasoil au consommateur propriétaire des installations, zone D, par livraisons égales ou supérieures à 1 000 litres, tous droits et taxes compris, à l'exception

des taxes au profit des aéroports ou des chambres de commerce ou de tous autres organismes.

FOD = P de l'hectolitre du fuel-oil domestique, zone D, par quantités de 14 001 à 26999 litres (classe C 3), au comptant net, sans escompte, franco installation de l'acheteur, T.V.A. incluse.

El = Indice des prix de l'électricité publié au Bulletin officiel des services des prix.

Sc = Indice des prix de sciages de sapin (coffrage) publié au Bulletin officiel des services des prix.

AG = Prix hors taxes des granulats suivants, pris sous trémies dans les ports fluviaux situés sur la Seine entre les écluses de gros 0/25 et 0,8 mètre cube de gravillon 5/25.

Lma = Indice de prix des laminés marchands en aciers A 33 publié au Bulletin officiel des services des prix.

Lmc = Indice des prix des ronds à béton en acier Fe E 40 A publié au Bulletin officiel des services des prix.

Cm = Indice pondéré national du prix du ciment publié au Bulletin officiel des services des prix.

PsdA = Indice produits et services divers A publié au Bulletin officiel des services des prix.

Sources:

-Bulletin officiel des services des prix, 2 Août 1975 page 389.

-Les mêmes formules de 1990 se trouve dans "Le MONITEUR" N° 4495-19 JANVIER 1990 Page 19.

Les notes de l'index de 1975 expliquent: "Les index de prix de travaux publics (index T.P.) ne tiennent pas compte des améliorations de productivité globale de ce secteur d'activité industrielle". La note de 1990 dit: Les index nationaux de prix de génie civil (index TP) ont été créés en 1975 (base 100 en janvier 1975). Divers changements sont intervenus dans le choix des paramètres élémentaires, sans toutefois conduire des modifications notables dans la composition des index.

Le pourcentage du coût de main-d'oeuvre n'a pas été modifié. Cela a une raison d'être. En effet, si l'on prend un chantier de tunnel réalisé avec un tunnelier, en apparence, on voit moins de monde par rapport à un chantier classique; cela ne veut pas dire que le chantier de tunnelier utilise moins du

monde, si l'on compte les ingénieurs et les ouvriers travaillant dans l'usine de fabrication de tunnelier, l'usine de préfabrication de voussoirs et les transports des équipements et des voussoirs. D'autre raison, dans un chantier traditionnel, on utilise beaucoup de main-d'oeuvre qualifié et non qualifié dont les salaires ne sont pas élevés, par contre un chantier moderne emploie des ingénieurs, des ouvriers hautement qualifiés, et finalement l'enveloppe de salaires revient au même.

En ce qui concerne les salaires, ceux des ouvriers dans les travaux publics de certaines régions ont été trouvés et présentés dans le tableau VIII.1.

Tableau.VIII.1 - Evolution des salaires mensuels des ouvriers dans les travaux publics (En F constants, corrigé selon l'indice PIB 1990)

	1975	1990	75 à 90	Par an
	Seine-Maritime	Nord-Pas-de-Calais		
Catégories				
professionnels:	Salaire F/mois	Salaire F/mois	%	%
Ouvrier manoeuvre	3298	4136	25,4	1,7
Ouvrier spécialisé:				
OS: 2 -	3848	4596	19,4	1,3
OS: 3 -	4123	4902	18,9	1,3
Ouvrier qualifié:				
OQ: 1 échelon	4398	5208	18,4	1,2
OQ: 2 -	4672	5515	18,0	1,2
OQ: 3 -	5082	6128	20,6	1,4
O H Q	5497	6587	19,8	1,3
Chef d'équipe:				
CE: 1 échelon	5767	6893	19,5	1,3
CE: 2 échelon	6181	7353	19,0	1,3
OHQ=Ouvrier Hautement Qualifié				

Le SMIC fixé à 7,71 F courants/heure, en F constants: 22,60 en1975.

Le SMIC fixé à 30,51 F/heure 1990

Sources: -Le moniteur Nov 1975, supplément N° 1.217 page174.

-Le moniteur Juin 1990, page 7, 20.

En francs constants, le coût de la main d'oeuvre a donc augmenté, ce qui montre bien que les salaires n'expliquent pas l'évolution du coût. Au contraire, ils augmentent les coûts.

En ce qui concerne les prix des matériaux de construction, une comparaison de leur indices de 1975 et de 1990 permet de voir l'évolution des prix.

Tableau.VIII.2 - Indices des prix des matières et des matériaux de construction

Indices des prix des matières et des matériaux (Base 100 valeur moyenne 01/1960)					
Symboles Matières		Indices	Indices	75 - 90	Par an
		Jan-75	Jan-90	+%	+%
I. Produits sidérurgiques					
Ho	Fonte hématite de moulage ordinaire	237	510	115	7,7
Ai	Barres Z 6 CN 18-09	195	449	130	8,7
Ai cc	Tôles LAC Z 2 CN 18-10	191	463	142	9,5
Ai cf	Tôles à froid Z 6 CN 18-09	176	501	185	12,3
Ai df	Tôles à froid Z 6 CNDT 17-12	196	526	168	11,2
Bi xc	Billetes d'acier fin XC 38	329	866	163	10,9
Lm a	Laminés marchands en acier A 33	302	498	65	4,3
Lm b	Laminés marchandes en acier A 50-2	283	562	99	6,6
Lm c	Ronds à béton en acier Fe E 40 A	297	491	65	4,3
Pta	Poutrelles en acier E 24-2 (I.P.E.)	267	532	99	6,6
Tc	Tôles à cristaux orientés	172	502	192	12,8
Td	Tôle dynamo	217	556	156	10,4
Tf	Plaque en acier E 24-2	283	484	71	4,7
Tm a	Tôle à chaud en acier E 24-2	233	458	97	6,5
Tt m	Tôle à froid TC 1 mm	245	590	141	9,4
II. Métaux non ferreux					
Br	Bronze en lingots	264	584	121	8,1
Cf	Fil de cuivre	159	457	187	12,5
Cp	Tôle de cuivre	171	584	242	16,1
Cu	Cuivre électrolytique en cathode	154	407	164	10,9
La	Laiton en lingots	259	709	174	11,6
Lb	Barre en laiton	196	624	218	14,5
Lp	Tôle en laiton	170	618	264	17,6
Pb	Plomb	223	416	87	5,8
Zm	Zamak	262	696	166	11,1
III. Énergie					
Ci	Charbon industriel	229	818	257	17,1
Ck	Coke de fonderie	309	1002	224	14,9
IV. Matériaux					
Bc	Briques creuses	205	401	96	6,4
Cm	Indice pondéré national du prix du ciment	206	681	231	15,4
Pl	Plâtre	229	832	263	17,5

Sc	Sciages de sapin de pays (coffrages)	346	677	96	6,4
Tl	Tuiles	239	489	105	7,0
V. Produits divers					
Bu	Caoutchouc artificiel Butyle	161	525	226	15,1
Ca	Caoutchouc feuille fumée	73	139	90	6,0
Cy	Polychlorure de vinyle	124	329	165	11,0
Hu	Huile isolante	168	632	276	18,4
VI. Indices Psd					
Psd A	Produits et services divers A	233	640	175	11,7
Psd B	Produits et services divers B	253	783	209	13,9
Psd C	Produits et services divers C	250	709	184	12,3
Psd D	Produits et services divers D	245	771	215	14,3
Psd T	Produits et services divers Téléphone	269	836	211	14,1

Sources:

- "BULLETIN OFFICIEL DES SERVICES DES PRIX". Le 12 Juillet 1975. Pages 367-370.
- "BULLETIN OFFICIEL DE LA CONCURRENCE, DE LA CONSOMMATION ET DE LA RÉPRESSION DES FRAUDES". Le 31 Juillet 1990. Pages 296-298.

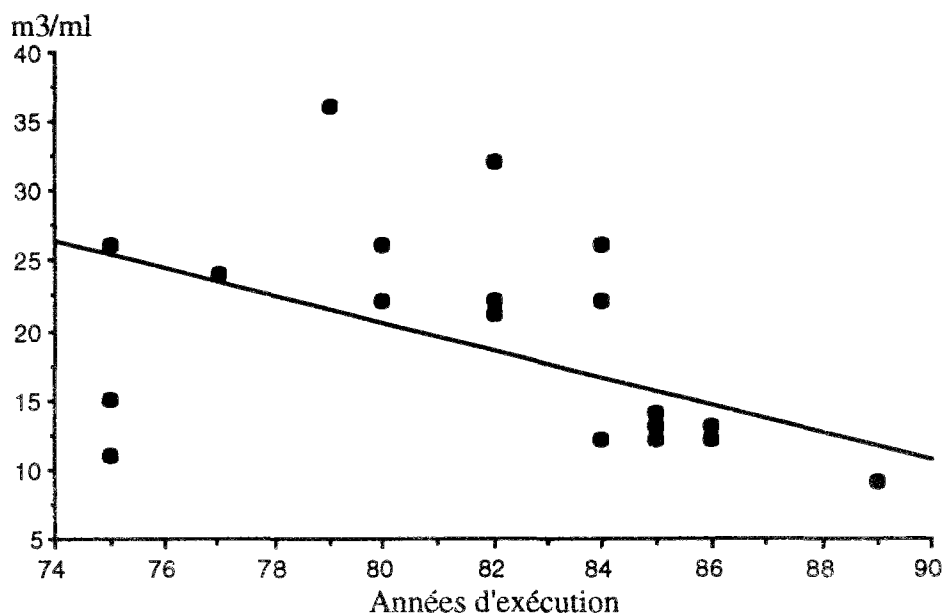
Le tableau VIII.2 montre que les prix des matières et des matériaux ont augmenté. Cela prouve que l'évolution des coûts des tunnels n'est pas favorisée par les prix des matériaux de construction et de l'énergie. Il faut chercher ailleurs les causes de l'évolution des coûts.

VIII.2- Les causes ayant une influence

VIII.2.1- La diminution du volume de structure en béton

Les résultats précédents (chapitres III, IV et V) ont montrés qu'il existe une liaison entre le coût et le volume de structure. Les deux graphiques suivantes donnent l'évolution du volume de structure de béton.

Fig.VIII.1 - Métros urbains-Tunnels exécutés en souterrain- Volume de structure en béton (m3) utilisé dans le temps

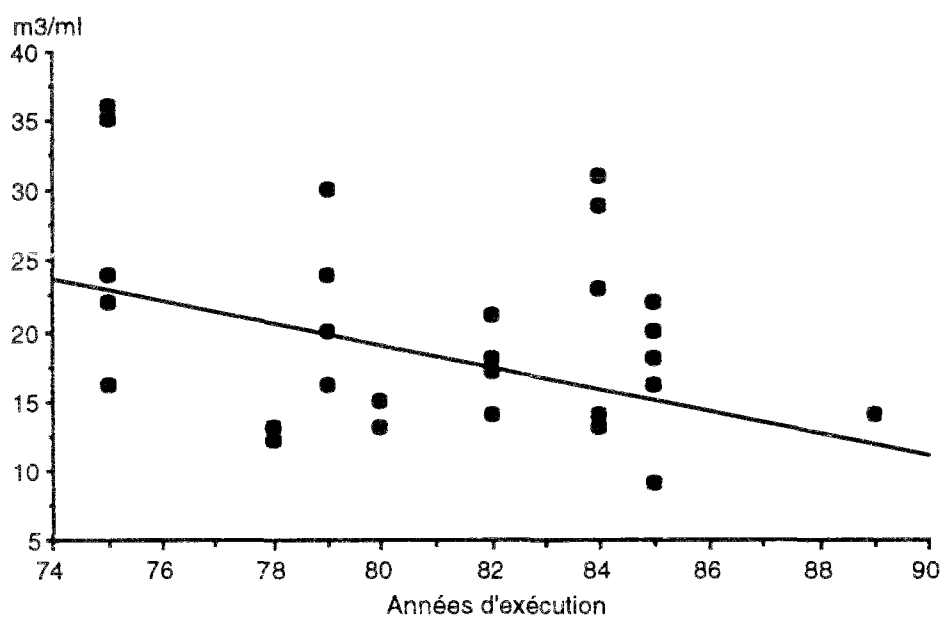


La formule issue de la régression est la suivante:

$$M3/ml = 98,45 - 0,97 \times \text{Années d'exécution}$$

(4,3) (-3,5)

Fig.VIII.2 - Métros urbains - Tunnels exécutés en tranchée couverte - Volume de structure en béton (m3) utilisé dans le temps



La formule issue de la régression est la suivante:

$$M3/ml = 82,2 - 0,79 \times \text{Années d'exécution}$$

(3,8) (-3,0)

Il s'agit de volume de structure du béton (m³) mise en place par mètre linéaire. Les figures VIII.1 et 2 montrent qu'on réalise des tunnels avec de moins en moins de béton. Étant donnée que le volume de structure est un facteur significatif des coûts, on peut dire que la diminution du volume de structure constitue une des causes de la baisse des coûts.

En effet, 4 raisons expliquent cette diminution:

- Le béton de haute performance est de plus en plus utilisé dans les travaux souterrains, par conséquent, cela a diminué l'épaisseur de structure.
- L'emploi des voussoirs préfabriqués par les tunneliers.
- Les meilleurs profils de tunnel trouvés par des ingénieurs.
- Les techniques d'exécution des travaux tel que le prédécoupage mécanique, la paroi préfabriquée, la parois moulée etc.

Les revêtements des tunnels et en particulier les anneaux de voussoirs en béton préfabriqués qui sont généralement associés en tant que structure définitive au creusement à l'aide de tunneliers, ont connu également ces dernières années des évolutions intéressantes, rendant leur coût très attractif et contribuant ainsi à la compétitivité de la méthode.

Cette évolution des revêtements en voussoirs s'est manifestée tant au plan de leur conception et notamment de leur dimensionnement conduisent à un volume de structure rapporté à la section utile plus faible que pour un ouvrage traditionnel (formes, assemblage, étanchéité...) que de leur fabrication (usines entièrement automatisées pour les tunnels de Villejuste, Sous la Manche et du Grand Belt).

En ce qui concerne les parois moulées, parois préfabriquées, elles ont constitué un progrès déterminant dans le domaines des travaux à ciel ouvert. Elles présentent l'avantage d'une grande rigidité qui diminue la

décomposition, de constituer un écran étanche et de pouvoir être utilisée comme piédroit du futur ouvrage. Lors qu'il est fait appel à cette possibilité, il en résulte directement un prix de revient moins élevé de l'ouvrage définitif.

VIII.2.2- Les progrès techniques

Depuis une dizaine année, en France, dans le domaine de travaux souterrain, on est passé des méthodes traditionnelles aux méthodes modernes. On abandonne au fur et à mesure les méthodes traditionnelles telles qu'injection, congélation, rabattement de nappe, air comprimé, pré soutènement. On utilise de plus en plus les tunneliers.

Les méthodes traditionnelles de traitement du terrain coûtent chers et leur utilisation est limitée. L'évolution des techniques dans ce domaine a permis soit de les transformer, soit de mettre au point de nouvelles méthodes. Cette évolution est provenue essentiellement de l'amélioration artificielle des caractéristiques des terrains, de l'utilisation à grande échelle de matériaux, de nouvelles techniques issues de cette utilisation (recomposerions, voussoirs, boucliers, prédécoupage mécanique). Il en est résulté des moyens plus efficaces pour lutter contre la décompression.

Les traitements modernes des terrains au moyen d'injections ont véritablement été mis au point en France. Ils ont constitué un progrès déterminant dans le domaine des travaux publics et tout particulièrement dans celui des travaux souterrain. D'après les visites sur les chantiers, les exécutions de traitements sont informatisées et faites avec les ordinateurs.

Ils permettent, soit de conférer aux terrains une cohésion qu'ils ne possèdent pas naturellement, soit d'abaisser leur perméabilité jusqu'à les rendre étanches, soit les deux. Ils ont ainsi rendu possible la réalisation de

nombreux ouvrages souvent spectaculaires, qui, sans eux, n'aurait pas pu être envisagée.

Ces améliorations techniques s'inscrivant plus généralement dans la modernisation des travaux public, changent l'économie des souterrains en améliorant les délais et les conditions d'exécution tout en réduisant les aléas. En ce qui concerne les progrès techniques pour l'exécution des travaux en souterrain dans les terrains meubles ou aquifères, la mise en oeuvre des tunneliers à pression de terre ou à pression de boue a été une véritable avancée. Ces machines permettent maintenant de choisir le souterrain là où il n'était possible que de construire en tranchée, en pont, ou de faire un détour. La technologie des tunneliers constitue un progrès décisif dans le domaine de la construction souterraine.

Les analyses des causes de l'évolution des coûts nous donnent quelques résultats quantitatifs: Coût des tunnels: -3,5% par an en moyenne; Quantité de matières en m³ béton/ml: -3,5% par an en moyenne; Prix des matières: +10,9% par an en moyenne); Prix du travail en salaires: +1,3% par an en moyenne; avec toutes ces données, on essaie de connaître la productivité du travail d'une manière suivante:

L_1 = Quantité de travail
 S_1 = Prix du travail
 M = Quantité de matières
 P = Prix des matières
 C = Coût des tunnels

En T_1 , $C_1 = L_1 S_1 + M_1 P_1$ avec $L_1 S_1 = M_1 P_1$

En T_2 , $C_2 = L_2 S_2 + M_2 P_2$ $L_2 S_2 = M_2 P_2$

$$\begin{array}{lll}
\text{On a } L_2 & = \chi L_1 & \text{avec} \\
S_2 & = \alpha S_1 & \alpha = 1,013 \\
M_2 & = \beta M_1 & \beta = 0,965 \\
P_2 & = \gamma P_1 & \gamma = 1,11 \\
C_2 & = \delta C_1 & \delta = 0,965
\end{array}$$

$$C_2 = \chi \cdot L_1 \cdot \alpha \cdot S_1 + \beta \cdot \gamma \cdot M_1 P_1 = \delta C_1 = \delta L_1 S_1 + \delta M_1 P_1$$

$$L_1 S_1 (\chi \cdot \alpha - \delta) = M_1 P_1 (\delta - \beta \cdot \gamma)$$

$$\chi \cdot \alpha - \delta = \frac{M_1 P_1}{L_1 S_1} (\delta - \beta \cdot \gamma)$$

$$\chi \cdot \alpha = 2\delta - \beta \cdot \gamma$$

$$\chi = \frac{2\delta - \beta \cdot \gamma}{\alpha} = \frac{1,93 - 1,071}{1,013} = 0,8479$$

Le résultat montre une tendance de progrès de productivité du travail dans le secteur des travaux souterrains, soit 15% par an. Cela constitue sans doute un indicateur du progrès technique s'ajoutant aux économies des matières.

VIII.2.3- Les expériences

Les expériences des ingénieurs constitue un autre facteur déterminant pour la maîtrise du coût. Ce qui est traduit souvent dans le choix des méthodes d'exécution bien adaptées au projet. Les figures VIII.3 et 4 présentent les méthode de traitement de terrain et les méthodes d'exécution des travaux pratiquées au cours de la période 1975 à 1990.

Fig.VIII.3 - L'évolution des coûts de tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain en fonction de traitement de terrain

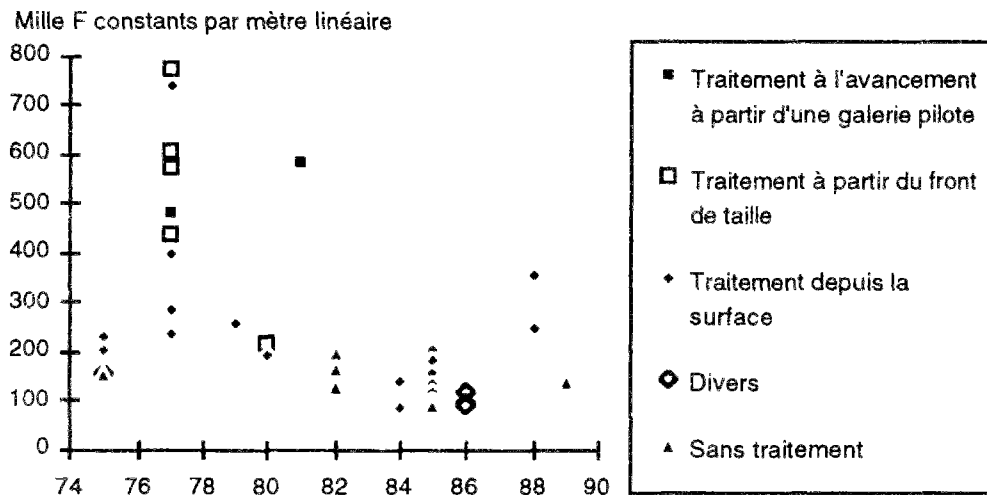
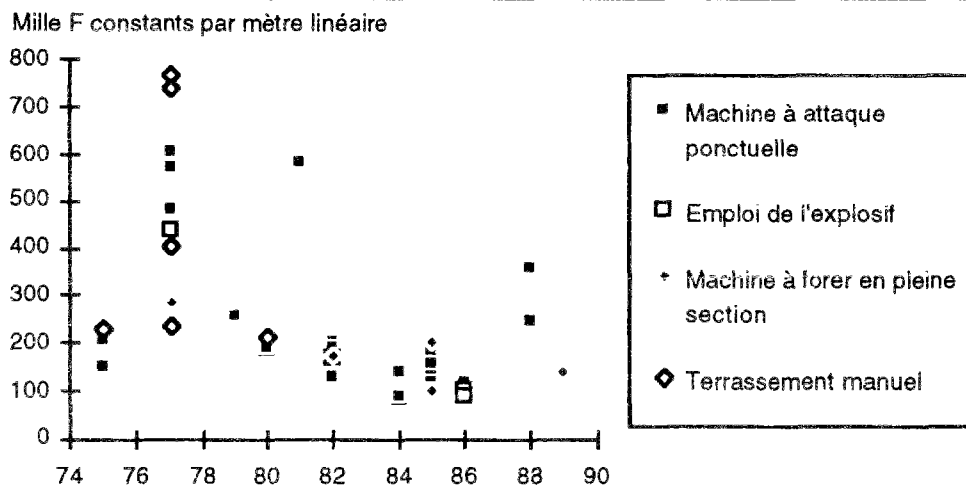


Fig.VIII.4 - L'évolution des coûts de tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain en fonction de terrassement



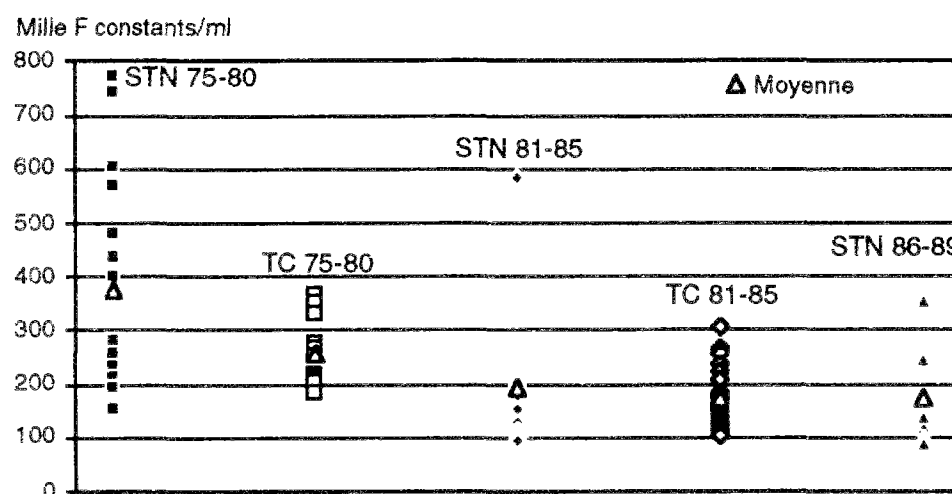
Les figures montrent qu'il y a des méthodes abandonnées après les années 80, ce sont les méthodes souvent onéreuses, par exemples le traitement à partir du front de taille, le traitement à l'avancement à partir d'une galerie pilote, le terrassement manuel...

L'expérience d'organisation du chantier contribue aussi à la maîtrise du coût. L'organisation d'un chantier de travaux souterrains est très complexe,

surtout le chantier de tunnel construit avec le tunnelier est comme une chaîne d'usine. L'organisation du travail y est plus systématique, tout éléments concourant à la réduction des coûts et à l'accroissement de sécurité.

La figure VIII.5 montre que l'écart type a beaucoup diminuée. C'est à dire les coûts sont moins dispersés et bien contrôlés (Dans la graphique, STN=tunnels exécutés en souterrain, TC=tunnels exécutés en tranchées).

Fig.VIII.5 - Coûts des tunnels enterrés de métros urbains et régionaux par tranche de période



Souterrains	Moyenne	Maximum	Minimum	Nb observa
75-80	376,3	771	153	18
81-85	195,4	585	87	22
86-89	175,2	356	91	6
Tranchées				
75-80	258	366	182	14
81-85	173,5	307	102	27
86-89	80	79	81	2

VIII.3 - Conclusion

Ce chapitre essaie d'examiner les causes de l'évolution du coût de tunnel. C'est un sujet vaste et difficile à préciser. Les explications auraient été plus précises si j'avais pu accéder aux archives des prix de revient des sociétés de

construction. De ce fait, les causes évoquées dans ce chapitre sont les principales et servent d'exemples. On peut toujours découvrir des causes nouvelles.

Et en synthèse des entretiens que j'ai eus avec les spécialistes dans les domaines des travaux souterrains, les progrès techniques, les expériences constituent bien les principales causes de l'évolution. On constate que les progrès techniques ont pour conséquence d'améliorer la sécurité, de diminuer la main d'oeuvre et d'augmenter les cadences d'avancement. La possibilité de mécaniser l'excavation à l'abri d'une protection sûre permet de franchir les contraintes géologiques et de rendre possible la solution du tunnel pratiquement dans tous les cas.

CHAPITRE IX

LES CONSEQUENCES DE L'EVOLUTION DES COUTS

Ce chapitre est pour l'objectif d'examiner les conséquences de l'évolution des coûts. Il est difficile d'apporter une réponse complète sur cette question, mais l'on peut néanmoins pressentir quelques lignes de force.

IX.1 - Les travaux souterrains - un grand marché

La baisse du coût de tunnels favorise les travaux souterrains qui a pour la conséquence d'augmenter les travaux souterrains et de substituer les infrastructures de surface en sous-sol. Les tunnels sont déjà et seront encore un grand marché. Depuis 5 ans, le montant des financement liés aux travaux souterrains en France a été multiplié par 4 (voir chapitre I. Introduction). Ils représentent une part de plus en plus importante de l'activité des travaux publics en France. Il y a au moins 3 raisons pour expliquer cette importance:

- On ne peut pas savoir si les coûts de tunnels vont continuer à baisser de la même façon que par le passé. Cependant, il est clair que la tendance à la baisse va continuer grâce aux progrès techniques, aux expériences, surtout si le robot peut s'utiliser dans les tunnels comme dans l'automobile et l'industrie électronique. Au minimum, il y aura la stabilité et la maîtrise des coûts.
- Dans les zones urbanisées, les percements de tunnels sont très souvent justifiés pour des raisons d'environnement. La tendance séculaire à enterrer les réseaux urbains semble devoir s'étendre dans le futur aux transports de

biens et de personnes. Or la baisse des coûts permet de construire davantage de tunnels en moins d'investissement, ce qui a pour conséquence de préserver l'environnement.

Les tunnels ou couvertures de voies en tranchée offrent toute une gamme d'avantages: l'amélioration de la circulation de surface provoque indirectement une réduction de la pollution de l'air. Surtout on bénéficie directement de la préservation des immeubles, monuments, parcs, la suppression du bruit, des coupures de cheminements et des aspects désagréables; la sensibilité à l'intrusion visuelle des routes ou des viaducs urbains est élevée et l'opposition du public entraîne souvent des délais de réalisation très importants. Ceci renforce l'intérêt des projets en tunnel.

L'implantation des transports en souterrain présente des avantages incontestables par rapport aux solutions "site propre au sol" ou "en viaduc" en ce qui concerne les points suivants: les réservations d'emprises; moindre contraintes de tracé; franchissement assez commode des accidents topographiques localisés; protection des sites et de l'environnement.

Enfin, des solutions intéressantes de réalisation de points d'échanges peuvent être mises en oeuvre dans le cadre d'opérations de rénovation de certains secteurs urbains, grâce à des aménagements parfois très importants regroupant différentes fonctions dans des ouvrages communs.

Les expériences recueillies sur ces chantiers laissent à penser que l'utilisation des tunneliers se généralisera pour la réalisation de futurs projets de franchissements en Europe. De nombreux grands projets en gestation à l'heure actuelle envisagent dès à présent des creusements de tunnel exclusivement à l'aide de tunneliers, par exemple:

- pour les traversées sous-marines (à moyen ou long termes), tunnels sous le Bosphore, sous les détroits de Gibraltar et Messine, liaisons souterraines entre le Danemark et l'Allemagne et le Danemark et la Suède;
- pour les traversées montagneuses, liaison T.G.V. sous les Alpes vers l'Italie, grands tunnels ferroviaires en Suisse (Rail 2000, Simplon, etc).
- et pour les souterrains urbains, nombreux projets de métros souterrains en France (Bordeaux, Rouen, extension à Lille, Lyon, lignes Météor et Eole à Paris, etc.) ou à l'étranger, liaisons autoroutières souterraines en région parisienne (projet Laser et Muse), à Lyon, etc.

D'ici à la fin du siècle, près de 200 km de tunnels devraient être en cours de creusement à travers les Alpes: liaison TGV France-Italie, doublement des tunnels ferroviaires du Saint-Gothard et du Lötschberg entre la Suisse et l'Italie. On évoque aussi le doublement du tunnel routier du Mont-Blanc. Nombreux sont les chantiers de métro en cours: Lille, Strasbourg, Paris avec Eole et Météor, Athènes, Milan, Guanton de Chine etc.

IX.2 - Les conséquences pour les autorités et privés

A l'heure actuelle, les autorités prennent de plus en plus en considération l'influence de l'environnement que le souterrain épargne au maximum, et qui peut être déterminante pour préférer généralement un tunnel à une infrastructure aérienne.

La qualité de vie et l'environnement sont aujourd'hui des préoccupations majeurs du public. Pour la protection de l'environnement et de la nature, chacun de nous paye une bonne charge. De nombreux dispositifs fiscaux existent en France qui ont une influence sur la qualité de l'environnement:

-Eau: les redevances pollutions acquittées par les industries 1/5 = 650 millions de F et les redevances pollutions des usages domestiques 3/5 = 1720 millions de F en 1989.

-Air: depuis 1985, une taxe parafiscale proportionnelle aux émissions de certains polluants dans l'atmosphère est perçue par l'Agence pour la Qualité de l'Air. Les recettes de la taxe étaient de 88 millions de F en 1990.

-Déchets: le montant de la taxe était de 8 milliards F en 1989.

-Énergie: les recettes fiscales étaient de 102,5 milliards en 1990.

Source: L'économie de l'environnement N° 258-259 "Économie et statistique"- ISEE Oct-nov 1992

Les travaux souterrains ont pour effet la protection d'environnement et la libération d'espaces qui peuvent devenir un square, un jardin, un espace vert, un site naturel ou des monuments. De ce fait, les écologistes, les paysagistes, les environnementalistes et les piétons sont réjouis de cette situation.

La baisse des coûts permet aux entreprises de construction d'avoir des prix compétitifs. Les maîtres ouvrages accepteraient facilement des projets qui ont un investissement moins onéreux et qui créent des emplois (voir tableau IX.1).

La conséquence de la création de l'emploi par les travaux souterrains est relative, parce que on ne connait pas combien d'emploi que le même montant de finance peut créer dans d'autre secteur.

Tableau IX.1 - Effectifs totaux et ouvriers par activité principale de travaux publics en France (1987 à 1992)

EFFECTIFS TOTAUX ET OUVRIERS PAR ACTIVITE PRINCIPALE

effectifs au 30 juin de l'année

	1988		1989		1990		1991		1992	
	effectifs totaux	effectifs ouvriers	effectifs totaux	effectifs ouvriers	effectifs totaux	effectifs ouvriers	effectifs totaux	effectifs ouvriers	effectifs totaux	effectifs ouvriers
ouvrages d'art, génie civil et structures métalliques	31 070	22 075	27 425	20 277	32 590	22 249	29 421	20 918	28 208	20 004
terrassements généraux	24 997	20 160	29 524	23 178	32 810	25 498	31 324	24 228	30 609	23 464
fondations spéciales, sondages, forages	4 261	2 489	4 197	2 459	4 461	2 636	4 757	2 835	4 879	2 721
travaux souterrains	2 733	1 245	9 429	4 243	6 359	3 878	14 018	6 887	11 682	5 639
travaux maritimes et fluviaux	3 044	1 709	2 588	1 257	2 262	1 020	1 911	1 206	2 425	918
travaux routiers	85 493	63 570	88 004	65 111	87 252	63 879	86 137	62 452	85 031	61 260
voies ferrées	5 050	3 869	4 803	3 578	4 396	3 350	4 724	3 652	4 880	3 689
adduction d'eau, assai- nisement, autres cana- lisations et installations	32 401	24 232	33 565	25 011	34 295	24 701	34 867	25 303	35 654	24 215
travaux électriques	71 879	45 741	69 954	45 117	70 203	43 652	68 385	42 300	67 510	41 427
ENSEMBLE	260 928	185 090	269 489	190 231	274 628	190 663	275 544	189 781	270 878	183 337

EVOLUTION DES EFFECTIFS TOTAUX ET OUVRIERS PAR ACTIVITE PRINCIPALE

effectifs au 30 juin de l'année

	variation effectifs totaux	1989/1988 effectifs ouvriers	variation effectifs totaux	1990/1989 effectifs ouvriers	variation effectifs totaux	1991/1990 effectifs ouvriers	variation effectifs totaux	1992/1991 effectifs ouvriers	moy. annu. 92/88 effectifs totaux effectifs ouvriers	
ouvrages d'art, génie civil et structures métalliques	-11,7%	-8,1%	18,8%	9,7%	-9,7%	-6,0%	-4,1%	-4,4%	-2,4%	-2,4%
terrassements généraux	18,1%	15,0%	11,1%	10,0%	-4,5%	-5,0%	-2,3%	-3,2%	5,2%	3,9%
fondations spéciales, sondages, forages	-1,5%	-1,2%	6,3%	7,2%	6,6%	7,5%	2,6%	-4,0%	3,4%	2,3%
travaux souterrains	245,0%	240,8%	-32,6%	-8,6%	120,4%	77,6%	-16,7%	-18,1%	43,8%	45,9%
travaux maritimes et fluviaux	-15,0%	-26,4%	-12,6%	-18,9%	-15,5%	18,2%	26,9%	-23,9%	-5,5%	-14,4%
travaux routiers	2,9%	2,4%	-0,9%	-1,9%	-1,3%	-2,2%	-1,3%	-1,9%	-0,1%	-0,9%
voies ferrées	-4,9%	-7,5%	-8,5%	-6,4%	7,5%	9,0%	3,3%	1,0%	-0,9%	-1,2%
adduction d'eau, assai- nisement, autres cana- lisations et installations	3,6%	3,2%	2,2%	-1,2%	1,7%	2,4%	2,3%	-4,3%	2,4%	0,0%
travaux électriques	-2,7%	-1,4%	0,4%	-3,2%	-2,6%	-3,1%	-1,3%	-2,1%	-1,6%	-2,4%
ENSEMBLE	3,3%	2,8%	1,9%	0,3%	0,3%	-0,6%	-1,7%	-3,4%	0,9%	-0,2%

IX.3 - Les risques possibles

Les effets des infrastructures en souterrains peuvent aussi être négatifs. La figure IX.1 représente quelques-unes des conséquences. Elle montre la baisse du coût peut avoir des effets positives et négatives.

Un grand marché des travaux souterrains aurait pour conséquence de créer l'encombrement du sous-sol. En effet, le sous-sol est non seulement une ressource, mais un espace qu'il faut protéger et organiser pour le profit de tous.

Le sous-sol, considéré comme un milieu, est un patrimoine. Il ne devrait pas être ignoré et devrait trouver un développement majeur dans le cadre de l'aménagement et de l'équipement des villes et du territoire.

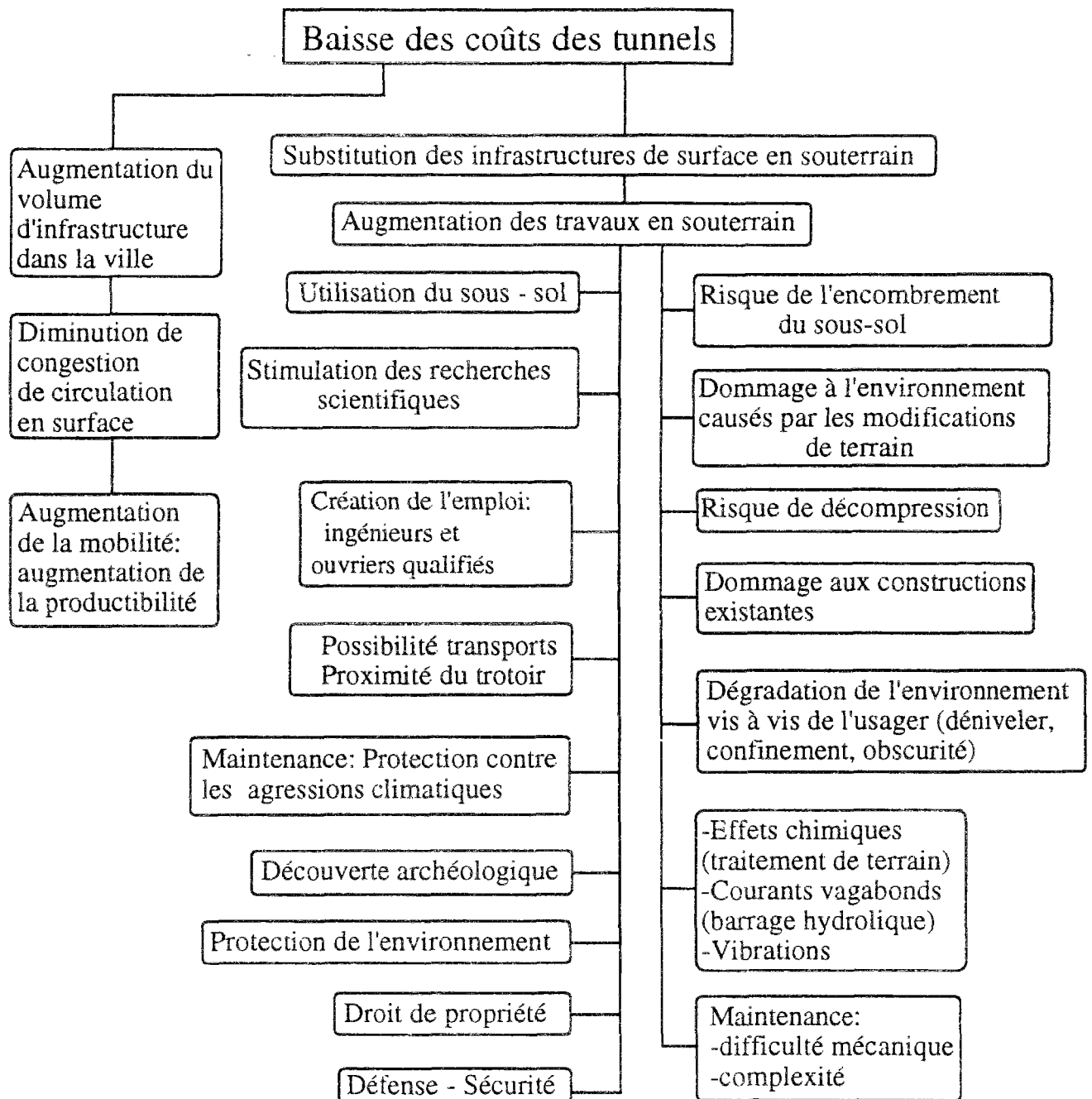
Par rapport au sol, l'effet de "coupure" n'existe pas dans ce cas. Par contre, l'établissement d'un transport souterrain peut créer un effet de coupure vis-à-vis des autres réseaux souterrains si certaines précautions ne sont pas prises lors de son implantation, y compris des nappes phréatiques.

Il serait nécessaire d'établir une réglementation, par exemple fixer les limites de profondeur, surtout pour les grandes opérations modernes qui nécessitent des concentrations et des réservations. Ainsi, serait-il nécessaire d'établir un schéma d'aménagement du sous-sol pour les villes, par niveaux ou par regroupements des réseaux.

IX.4 - Conclusion

Il est difficile de tirer des conséquences sur la baisse des coûts. Néanmoins, quelques remarques ont été faites dans ce chapitre et sont regroupées dans la figure IX.1.

Fig. IX.1 - Récapitulation des conséquences de la baisse des coûts des tunnels



3 constatations pour conclure:

- Nous assistons en effet à une augmentation rapide des travaux souterrains.
- La baisse du coût augmente les travaux souterrains qui peuvent avoir des

effets positifs et négatifs. Mais la plupart des effets négatifs peuvent être évités par des mesures nécessaires.

- L'approfondissement ne doit être pas une exclusivité des grandes opérations en souterrain, limiterait ainsi le confort des voyageurs et augmenterait le coût de station et de la maintenance.

- Face à ce marché potentiel, il apparaît intéressant de standardiser des machines pour augmenter la production.

CHAPITRE X

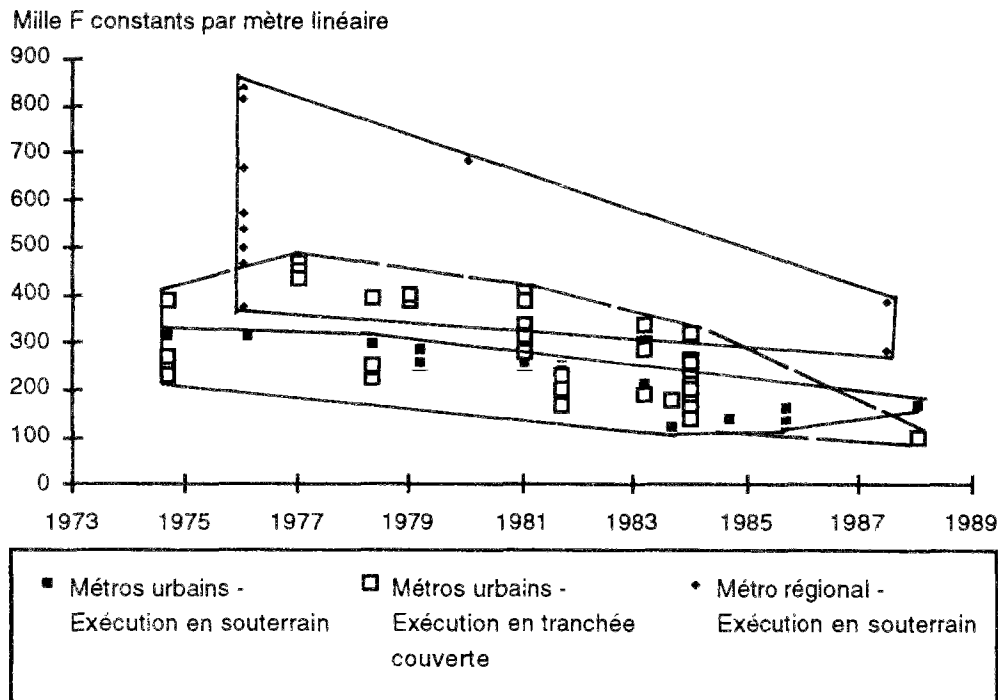
LES CONCLUSIONS GENERALES

L'étude sur l'évolution des coûts des tunnels des métros urbains et régionaux de France fait apparaître de nombreux résultats qui dépassent l'évolution des coûts. Les principaux résultats et les conclusions sont résumés dans ce chapitre.

X.1 - La situation des coûts des tunnels

Les analyses statistiques ont mis en évidence le coût total des tunnels selon le mode d'exécution et le type de réseau, voir figure X.1. Elle montre que les coûts des tunnels sont différents selon le mode d'exécution et le type de réseau.

Fig.X.1 - Coût total dans le temps selon le mode d'exécution et le type de réseau



	Moyenne pondérée	Maximum	Minimum	Nombre d'observat-	Total en m
Métros urbains - Exécution en souterrain	204,9	312,1	128,4	32	29561
Métros urbains - Tranchées couvertes	271,8	462,9	95,8	43	23747
Métro Régional - Exécution en souterrain	514,5	836,5	284,8	14	7600

Le classement des ouvrages selon ces trois familles apparaît pertinent car:

- d'une part, l'incidence des contraintes extérieures diffère sensiblement selon que l'on adopte le parti d'exécuter l'ouvrage en tranchée couverte ou à l'avancement,
- d'autre part, les ouvrages du métro régional sont plus difficilement insérables dans l'environnement, compte tenu des caractéristiques du système de transport, qui impose notamment des sections d'ouvrages plus importantes et des règles de tracé plus contraignantes (rayons minimaux admissibles).

L'étude a montré les postes de dépense qui forment le coût total d'un ouvrage souterrain ainsi que leurs pourcentages par rapport au coût total. Ils sont présentés dans le tableau X.1.

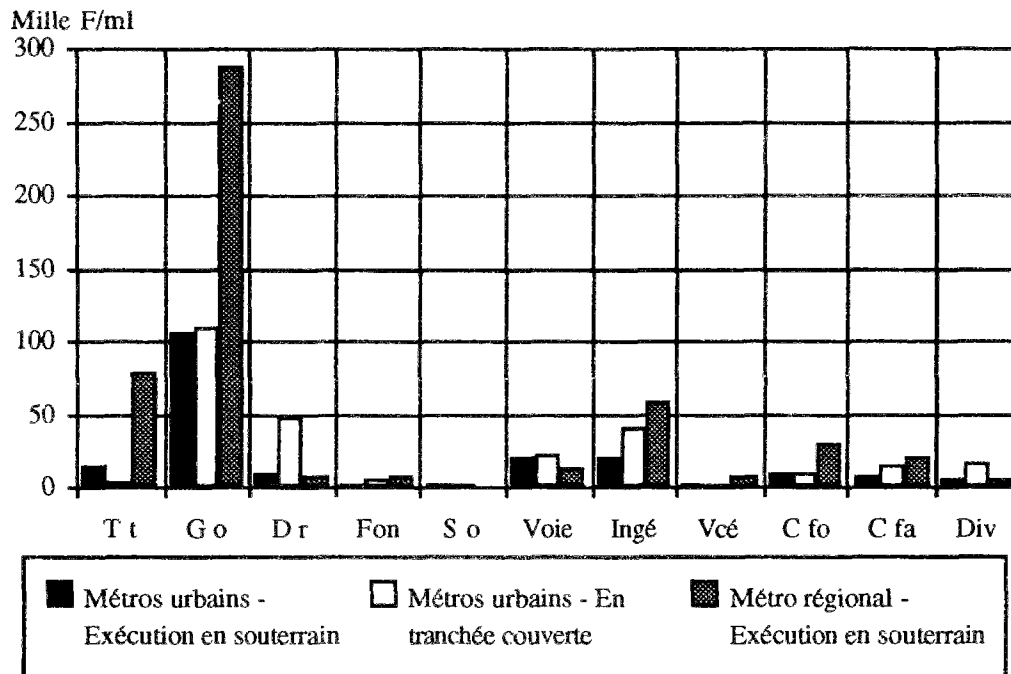
Tableau.X.1 - Coûts des tunnels par postes de dépense - Selon le type du réseau et des méthodes d'exécution (En mille F constants/ml)

Type de réseau	Métros urbains		Métros urbains		Métro régional	
Méthode d'exécution	En souterrain		En tranchée couverte		En souterrain	
Postes de dépenses	Moyenne pondérée	100 %	Moyenne pondérée	100 %	Moyenne pondérée	100 %
Traitement de terrain	14,9	9,15 %	4,3	2,07 %	78,9	19,25 %
Gros oeuvre (Go)	105,9	52,06 %	109,9	43,62 %	287,2	53,80 %
Déviations des réseaux (Dr)	8,8	4,48 %	47,8	15,51 %	8,2	2,31 %
Foncier (Fon)	2,4	1,56 %	4,8	2,46 %	7,3	1,30 %
Second oeuvre (So)	1,7	0,76 %	0,6	0,29 %		
Voie	20,4	8,85 %	22,6	7,45 %	12,6	2,09 %
Ingénierie	21	10,46 %	39,8	13,98 %	58,9	11,42 %
Équipements de Vcé	1,4	0,68 %	1,1	0,52 %	7,2	1,06 %
Équipements des c forts	9,3	5,21 %	9,7	4,69 %	29,6	4,85 %
Équipements des c faibles	8,1	4,59 %	14,9	5,99 %	19,7	3,25 %
Dépenses divers	6	2,02 %	16,3	2,77 %	4,9	0,65 %

Note: Vcé= ventilation, climatisation et épuisement; c=courants

Une comparaison des postes de dépense concernant les 3 familles des coûts a été faite est présenté dans la figure X.2.

Fig.X.2 - Distribution des coûts moyens par postes de dépense - Selon le type du réseau et des méthodes d'exécution



La figure X.2 montre que le gros oeuvre est un poste de dépense majeur.

La constatation des composantes des coûts a permis de regrouper les postes de dépense en deux catégories:

-Les *coûts hors équipements* regroupant les postes de gros oeuvres, le coût des traitements de terrain, le coût de déplacement des réseaux , le coût d'acquisition de foncier.

-Les *coûts des équipements* : Équipements des courants forts et faibles, de ventilation, de climatisation, d'épuisement, voie.

Tableau.X.2 - Coûts des tunnels selon le type du réseau et des méthodes d'exécution (En milliers de F constants/ml)

	Moyenne pondérée	Maximum	Minimum
Métros urbains			
Exécution en souterrain:			
Coût total	204,9	312,1	128,4
Coûts hors équipements	154,3	256,6	90,8
Coûts des équipements	46	77,2	13
Métros urbains			
Exécution en tranchée couverte			
Coût total	271,8	462,9	95,8
Coûts hors équipements	195,2	365,8	79,3
Coûts des équipements	53,4	126,8	16,5
Métro régional			
Exécution en souterrain			
Coût total	514,5	836,5	284,8
Coûts hors équipements	431,1	771,3	247,3
Coûts des équipements	77,9	95,9	32,9

La figure et le tableau X.2 montrent que le coût du gros oeuvre représente une partie importante du coût total.

X.2 - L'évolution des coûts et les facteurs déterminants

Le coût de tunnel est un complexe, il dépend de plusieurs facteurs quantitatifs (Année de construction, longueur, section etc.) et qualitatifs (méthode de réalisation, urbanisation). Ces facteurs ont été analysés isolément et cela donne peu d'informations intéressantes. Les résultats considérés significatifs sont les suivants:

X.2.1 - Les résultats issus des analyses des facteurs pris isolément

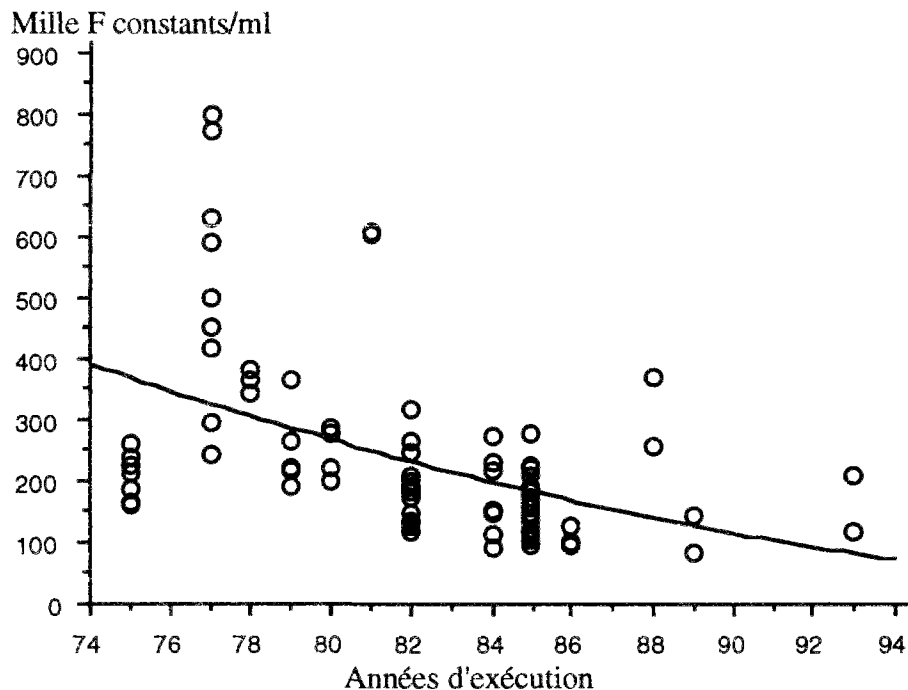
Evolution des coûts au cours du temps

L'étude a montré une décroissance des coûts au cours du temps pour les trois familles d'ouvrages (tunnels exécutés en souterrain pour les métros urbains et régionaux, tunnels exécutés en tranchée couverte pour les métros urbains).

Bien que les corrélations R^2 (de l'ordre de 0,30) ne sont pas très bonnes, on peut néanmoins indiquer que l'ensemble de coûts présentent une tendance à la

baisse de l'ordre de 3,5 % en moyenne par an, cette tendance est confirmée par l'analyse par régression multiple(voir la fig X.3).

Fig.X.3 - Evolution des coûts de tunnels - Tous les types de réseaux et les modes d'exécution



Influence du coût de gros oeuvre sur la baisse des coûts

En ce qui concerne les coûts hors équipements des tunnels de différents réseaux, l'évolution de chaque poste de dépense a été examinée. Les résultats ont montré que le coût de gros oeuvre a beaucoup baissé et le coût des traitements de terrain, d'acquisition de foncier et de déplacement des réseaux a très peu changé, donc l'évolution des coûts est influencée nettement par la baisse des coûts de génie civil.

Incidence de la section terrassée (m2)

Une incidence de la section terrassée (m2) sur le coût des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain a été démontrée. Il apparaît que

ce facteur joue de façon importante sur le coût. De plus, la bonne valeur de la corrélation ($R^2=0,76$) démontre que la relation est significative.

Incidence du volume de structure (m3)

Une relation entre le coût et le volume de structure (m3) a été établie, toujours pour les ouvrages exécutés en souterrain. Ce facteur constitue également un élément déterminant du coût. Bien que la corrélation soit moins bonne que pour la section terrassée ($R^2=0,65$), la répartition des valeurs est plus homogène.

Les facteurs qualitatifs sont déterminants sur le coût telles que les méthodes d'exécution des travaux, les méthodes de traitement de terrain pour les ouvrages exécutés en souterrain, les méthodes de blindage périphérique pour les ouvrages exécutés en tranchée couverte etc.

L'analyse des autres facteurs pris individuellement n'a pas donné de résultats satisfaisants. Cela n'a rien d'étonnant, car la formulation des coûts des tunnels est complexe. Aussi ont été analysés par la méthode de la régression multiple plusieurs facteurs quantitatifs et qualitatifs combinés.

X.2.2 - Les résultats issus des analyses de l'ensemble des facteurs

Facteurs déterminants sur les coûts

Après plusieurs itérations, en utilisant différentes composition des variables, les résultats suivants ont été obtenus et sont présentés dans le tableau X.3.

Les chiffres du tableau X 3 sont très significatifs. Plusieurs remarques apparaissent:

1. Une analyse par régression a été faite pour l'ensemble des observations (89 dont 57 pour les tunnels exécutés en souterrains de métros urbains et

Tableau X.3 - Ensemble des coûts des tunnels - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain et en tranchée couverte
Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives (Mille F constants/ml)

Variable		Nb d'ob-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Variables explicatives		servation																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Expliquée	Lg	An	Ov	St	Vs	Pt	Hl	Cv	Pu	Su	Tc	Sr	Pa	Gb	Gf	Co	Ss	Bl	Pc	Bl	Pm	Pp	Ir	Po	Rl	Ft	Mp	Mf	Tm	Cl	Pr	Pt	Ts	Tf	Tg	N3	N2	Cons-	Nb																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Coût de tunnel - L'ensemble (37 variables)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Mille F	-0,0004	-4,99	-0,39	0,14	4,26	-6,58	2,28	-6,03	-14,24	-253,86	-185,24	-46,58	-75,7	-74,56	-76,27	21,0	110,2	-174,5	-73,82	-137,1	-81,0	1,1	45,28	13,97	16,28	26,8	-24,33	70,6	-29,95	21,99	-33,63	2,49	88,56	15,0	91,23	89	0,87																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	(-0,02)	(1,5)	(0,1)	(0,2)	(2,0)	(-2,0)	(1,8)	(-0,1)	(-0,3)	(-5,8)	(-1,5)	(1,3)	(-2,4)	(-2,2)	(-1,9)	(0,3)	(2,5)	(-1,4)	(-0,9)	(1,5)	(-0,9)	(0,02)	(1,0)	(0,2)	(0,1)	(0,5)	(-0,4)	(1,0)	(-0,7)	(0,4)	(0,6)	(0,1)	(1,5)	(0,2)	(2,8)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Coût de tunnel - L'ensemble (13 variables t > 95 %)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Mille F	-7,24	4,73	-7,78							-275,39	-260,85																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	(-3,4)	(3,3)	(-4,0)							(9,8)	(-5,1)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Coût de tunnel - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain (22 variables)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Mille F	-0,001	-9,69	-17,61	1,77	3,25	-6,46	5,09	-117,72	-164,18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	(0,2)	(-2,2)	(-0,9)	(0,9)	(1,2)	(-1,9)	(0,7)	(-1,3)	(1,7)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Coût de tunnel - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain (9 variables, t > 95 %)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Mille F	-5,10	4,69	-7,21	5,32																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	(-2,1)	(3,1)	(-2,9)	(3,1)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Coût de tunnel - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain (3 variables, t > 95 %)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Mille F	7,57																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	(5,8)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Coût de tunnel - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain - Avec les niveaux de technicité (17 variables)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Mille F	0,03	-2,01	-10,39	1,65	5,07	-5,92	5,74	54,88	-63,78																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	(1,3)	(-0,4)	(-1,0)	(0,9)	(1,9)	(-1,9)	(2,0)	(0,7)	(0,8)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Coût de tunnel - Métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain - Avec les niveaux de technicité (5 variables, t > 95 %)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Mille F	6,04	-5,88	5,68																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				

Notes:

Facteurs communs à tous les types d'ouvrages:

An: Années de construction;

Lg: Longueurs (m);

Pa: Paris

Ov: Ouverture intérieure (m)

St: Section terrassée(m2)

Vs: Volume de structure (m3/ml);

Gf: Géologie (faible);

Pt: Profondeur du rail par rapport au sol naturel (m);

Hl: Hauteur immergée (m);

Cv: Centre ville;

Pu: Périphérie urbaine;

Gb: Géologie (bonne);

Gf: Géologie (faible);

Facteurs spécifiques aux tranchées couvertes :

Tc: Tranchée couverte;

Co: Ciel ouvert;

Bl: Berlinolise;

Pm: Parol moulée;

Pp: Parol préfabriquée;

Pc: Palpeplanche;

Ss: Sans soutènement;

Bt: Butons;

Ir: Injection radier;

Po: Pompage;

Rl: Rideau d'injection périphérique;

Ft: Fouille talutée.

Facteurs spécifiques aux souterrains :

Su: Souterrain - métrés urbains;

Sr: Souterrain - métré régional;

Mp: Machine à attaque ponctuelle;

Mf: Machine à forer en pleine section;

Tm: Terrassement manuel;

Cl: Cintres-planches de blindage;

Pr: Prévoûte;

Tf: section divisée.

Pt: Pas de traitement;

Ts: Traitement depuis la surface

Tf: Traitement à partir du front de taille

Tg: Traitement à partir d'une galerie de pilote.

N2: Niveau de technicité 2 (correspondant: Tm, Pt, Mf)

N3: Niveau de technicité 3 (correspondant: Pt, Ts, Tg, Tm,

Tf section divisée).

régionaux, 43 pour les tunnels exécutés en tranchée couverte de métros urbains). L'avantage est qu'elle se base sur un grand nombre d'observations, mais l'interprétation est délicate. Cette analyse de l'ensemble donne les renseignements suivants:

1. L'ensemble de 89 observations

Pour l'ensemble de 89 observations, avec 37 variables explicatives(y compris les niveaux de technicité), 13 variables significatives au seuil de 95 % sont repérées avec le R^2 : 0,85 (voir le premier cadre du tableau X.3). Elles donnent les renseignements suivants:

Pour les variables communes à tous les types d'ouvrages:

- Une décroissance du coût au cours du temps;
- Une décroissance à la diminution du volume de structure;
- Le tunnel plus profond, moins cher;
- Les conditions géologiques sont significatives.

Pour les variables spécifiques aux tunnels en tranchée couverte:

- Le coût de tunnel métro urbain exécuté en tranchée couverte représente moins 260,85 F par rapport au coût de tunnel métro régional exécuté en souterrain;
- La méthode d'exécution à ciel ouvert est moins onéreuse par rapport à la méthode d'exécution sous dalle pour des tunnels en tranchée couverte;
- La méthode de soutènement par bouton est onéreuse;
- Le type de blindage périphérique par paroi moulée est moins cher.

Pour les variables spécifiques aux souterrains:

- Le coût de tunnel métro urbain exécuté en souterrain est de - 275,39 F par rapport au coût de tunnel métro régional exécuté en souterrain;
- La méthode de soutènement par pré-voûte est cher par rapport aux autres méthodes.

Par expérience, on sait que les variables longueur, section terrassée, urbanisation sont des facteurs importants, mais qui ne sont pas repérées dans le modèle, la raison est due au mélange des types de réseaux et des méthodes d'exécution.

2. Tunnels de métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain

Une analyse de l'ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain (45 observations) a été réalisée. Les 9 facteurs significatifs ont été retrouvés et la corrélation est bonne ($R^2=0,92$, voir le deuxième cadre du tableau X.3).

Les 9 variables apparaissent être nombreuses, donc la troisième équation simplifiée et améliorée a été mis au point avec 3 variables. Il regroupe la totalité des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain. Le R^2 est 0,88.

L'analyse de l'ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain nous fournissent les renseignements suivants:

- Les variables significatives sont: Année de construction, volume de structure (m^3), profondeur (m), présence de l'eau, urbanisation, méthodes de traitement de terrain et d'exécution.
- Le type de réseau est un facteur important. Le $S_r = 1$ pour le métro régional (+ 208,03) et 0 pour tunnels de métros urbains.

- La troisième équation retrouve les facteurs importants, mais de façon beaucoup plus simple (avec 3 variables). Le facteur temps n'apparaît plus comme significatif, cela tient au nombre limité des observations concernant le métro régional.
- L'analyse de l'ensemble des ouvrages en ligne de métros urbains et régionaux exécutés en souterrain donne un bon résultat (R^2 est élevé). Intrinsèquement, ce sont des tunnels exécutés avec les mêmes méthodes malgré la différence des réseaux.

3. Tunnels de métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain (avec niveaux de technicité)

Toujours pour la famille des ouvrages exécutés en souterrain, une autre recherche a été réalisée, il s'agit de classer les variables qualitatives influençant les coûts en fonction des niveaux de technicité. une analyse par la régression en combinant les niveaux de technicité et les facteurs quantitatifs a été réalisée. Les résultats ont montré que les coûts sont bien expliqués par les facteurs section terrassée, volume de structure, urbanisation, niveaux de technicité, profondeur, présence de nappe phréatique et le type de réseau. L'analyse démontre l'importance des facteurs pris en compte. La corrélation entre les coûts et ces facteurs est forte ($R^2=0,88$, voir le 3^{ème} cadre du tableau X.3).

Cette analyse donne aussi 3 renseignements:

Premièrement, les tunnels de premier niveau sont les moins onéreux, ce qui correspond aux tunnels en terrassement mécanisé en pleine section ou demi section supérieure sans traitement de terrain ou un traitement depuis la surface.

Deuxièmement, les coûts sont médians pour le deuxième niveau, caractérisé par le terrassement non mécanisé, sans traitement ou un traitement de terrain depuis la surface. La méthode de terrassement en section divisé ou non intervient peu.

Troisièmement, les tunnels réalisés en troisième niveau de technicité sont les plus onéreux. Le troisième niveau correspond particulièrement au traitement de terrain d'avancement ou à partir d'une galerie quelque soit la mécanisation et la section pleine ou divisée.

X.2.3. Les résultats issus des analyses selon le type de réseau et les méthodes d'exécution

L'analyse des variables selon le type de réseau et les méthodes d'exécution a été faite et les résultats sont présentés dans le tableau X.4 qui nous donnent des renseignements suivants:

1. Tunnels de métros urbains - Exécution en souterrain

Pour cette famille de tunnels, les résultats d'analyse (voir le premier cadre du tableau X.4) ont montré que les facteurs significatifs trouvés sont: longueur de l'ouvrage, année de construction, section terrassée(m2), volume de structure(m3), urbanisation et méthode de soutènement. Le R^2 est 0,70.

Les équations nous donnent les renseignements suivants:

- Les coûts des ouvrages en ligne de métros urbains exécutés en souterrain sont assez bien expliqués par les six variables.
- Il existe une économie d'échelle (longueur), mais elle n'est pas importante.
- Une décroissance des coûts au cours du temps.
- Les coûts augmentent avec le volume de structure.
- L'urbanisation est un facteur important.

Tableau X.4 - Coût de tunnel selon le type du réseau et des méthodes d'exécution (Mille F constants/ml)
Coefficients des équations de régression expliquant le coût par diverses variables explicatives

Variable	Variables explicatives																										Conserva							
Explicite	Ig	An	Ov	St	Pf	Hi	Cv	Pu	Pa	Gb	Gf	Co	Ss	Bt	Pc	Bi	Pm	Pp	Ir	Po	Ri	Mp	Mf	Tm	Ci	Pr	Pt	Ts	Tf	ta	tion	R2		
Coût de tunnel - Métros urbains - Exécution en souterrain (20 variables)																																		
Mille F	-0,01	-2,99	1,88	-3,11	5,64	0,07	0,33	-29,94	-59,14	9,18	-11,69	-32,58										24,02	29,83	56,87	-16,45	23,97	-8,12	13,26	-0,54	904,22	32	0,80		
	(-0,8)	(-0,6)	(0,2)	(-1,9)	(1,9)	(0,01)	(0,2)	(-0,4)	(-0,7)	(0,2)	(-0,3)	(-0,7)									(0,4)	(3,1)	(0,7)	(-0,3)	(0,5)	(-0,2)	(0,4)	(-0,4)	(-0,0)	(1,0)				
Coût de tunnel - Métros urbains - Exécution en souterrain (6 variables, t > 95 %)																																		
Mille F	-0,02	-5,76		-3,71	6,00			-50,74																										
	(2,3)	(3,0)		(-3,8)	(4,3)			(3,7)																										
Coût de tunnel - Métros urbains - Exécution en tranchée couverte (22 variables)																																		
Mille F	0,00	-8,56	26,29	0,74	-2,8	-5,36	-14,5	23,63	-10,98	-45,2	8,94	0,76	-73,93	-22,59	72,42	-68,73	-72,6	-89,30	-35,25	85,90	50,17	29,42												
	0	(-2,0)	(2,0)	(0,9)	(-0,8)	(-0,7)	(-1,1)	(0,5)	(-0,2)	(-0,9)	(0,2)	(0,1)	(-1,8)	(-0,4)	(1,9)	(-0,7)	(-1,3)	(-1,3)	(-0,6)	(1,1)	(1,3)	(0,5)												
Coût de tunnel - Métros urbains - Exécution en tranchée couverte (8 variables, t > 95 %)																																		
Mille F	-7,39	40,09		-3,52		26,01							-65,03		49,08		-46,70	-55,88																
	(-2,6)	(5,8)		(-3,0)		(1,8)							(-2,6)		(2,5)		(-2,2)	(-2,1)																
Coût de tunnel - Métros urbains - Exécution en tranchée couverte (4 variables, t > 95 %)																																		
Mille F	-12,9	43,23		-3,06				-40,33																										
	(-7,7)	(6,8)		(-3,1)				(-3,3)																										
Coût de tunnel - Métro régional - Exécution en souterrain (12 variables)																																		
Mille F	1,12	-2,08	66,65	-6,49	9,84	-50,8	16,67						199,08																					
	(3,3)	(-0,3)	(2,7)	(-1,6)	(1,6)	(3,4)	(1,5)						(1,4)																					
Coût de tunnel - Métro régional - Exécution en souterrain (9 variables, t > 95 %)																																		
Mille F	1,35	87,88	-6,99	11,59	-63,17								303,46																					
	(6,7)	(5,6)	(-2,5)	(2,7)	(-7,9)								(4,6)																					
Coût de tunnel - Métro régional - Exécution en souterrain (3 variables, t > 95 %)																																		
Mille F		7,51		-8,84	16,63																													
		(3,4)		(-2,0)	(2,2)																													
Notes:																																		
Facteurs communs à tous les types d'ouvrages:																Facteurs spécifiques aux tranchées couvertes :																		
An: Années de construction;																Mp: Machine à attaque ponctuelle;																		
Lg: Longueurs (m);																Mf: Machine à forer en pleine section;																		
Pa: Paris																Tm: Terrassement manuel;																		
Ov: Ouverture intérieure (m)																Ci: Cintre+planches de blindage;																		
St: Section terrassée(m2)																Ts: Traitement depuis la surface																		
Vs: Volume de structure (m3/ml);																Tf: Traitement à partir du front de taille																		
																Pr: Prévoûte;																		
																Pt: Pas de traitement;																		

- La pré-voûte est une méthode onéreuse, mais elle concerne des ouvrages difficiles.
- La section de terrassement et le volume sont deux facteurs liés; dans ce modèle les deux sont significatifs.

2. Tunnels de métros urbains - Exécution en tranchée couverte

A propos des coûts de tunnels des métros urbains exécution en tranchée couverte, les facteurs significatifs trouvés sont: temps, ouverture, volume de structure, urbanisation, méthodes de terrassement et de blindage périphérique. Les deux équations sont significatives (voir 2 ème cadre du tableau X.4). L'analyse économétrique nous donne les renseignements suivants: Les coûts des tunnels de métros urbains exécutés en tranchée couverte sont bien expliqués par les variables: temps, ouverture, volume, urbanisation, méthodes de terrassement, de soutènement et type de blindage périphérique.

3. Tunnels de métros urbains - Exécution en tranchée couverte

Pour les coûts du métro régional exécutés en souterrain, l'analyse est limitée par le petit nombre des observations (14), néanmoins, les résultats montrent que les facteurs significatifs sont: section de terrassement, profondeur d'ouvrages et la présence de l'eau (voir le 3 ème cadre du tableau X.4). Dans cette famille du coût, le nombre d'observations n'est pas suffisamment important pour établir une tendance d'évolution de coût. En réalité, en ajoutant l'année de construction dans ce modèle, la baisse des coûts se manifeste, mais est peu significative sur le plan statistique.

L'analyse de l'ensemble des observations ou selon le type de réseau et les méthodes d'exécution donne des résultats comparables, mais les résultats issus des analyses selon le type de réseau et les méthodes d'exécution ont été obtenus avec moins d'observation

Tableau.X.5 - Facteurs significatifs pris en compte dans les analyses par régression multiple - Récapitulation

Facteurs	Ensemble Toutes Méthodes exécution	Ensemble Exécution souterrain	Métros urbains Exécution souterrain	Métros urbains Tranchée Couverte	Métro régional Exécution souterrain
Année de construction	-X	-X	-X	-X	
Longueurs (m)			-X		X
Ouverture intérieure (m)				X	X
Section terrassée(m2)			-X		-X
Volume de structure (m3/ml)	X	X	X	-X	X
Profondeur (m)	-X	-X	-X		X
Hauteur immergée (m)		X			
Centre ville				X	
Périphérie urbaine		-X		-X	
Géologie (bonne)	-X				X
Géologie (faible)	-X				
Tranchée couverte	X				
Ciel ouvert	-X			-X	
Berlinoises				-X	
Paroi moulée	-X			-X	
Butons	X			X	
Souterrain - métros urbains	-X				
Souterrain - métro régional		X			
Machine à attaque ponctuelle					-X
Machine à forer en pleine section					-X
Cintre+planches de blindage		X	-X		
Pré-voûte		X	X		-X
Pas de traitement	-X				
Traitement à partir du front de taille	X	X			
Niveau de technicité 2		X	X		X
Niveau de technicité 3		X	X		X
R ²	0,85	0,92	0,71	0,74	0,98
Nombre d'observation	89	45	32	43	14

Le tableau X.5 regroupe tous les facteurs significatifs issus des analyses.

Une comparaison a été essayée entre les coûts officiellement prévus pour réaliser les tunnels de Météor et de la ligne D à Paris et ceux calculés par les modèles établis par la présente étude. Les résultats sont encourageants. Ils montrent que deux modèles construits à partir des observations statistiques sont acceptables sur ces deux exemples. Elle nous fournit les renseignements suivants concernant les coûts des tunnels de Météor et de la ligne D:

- Les coûts se situent dans le courant général de l'évolution constaté: les coûts des tunnels se stabilisent;
- Les coûts se situent dans la partie basse de la fourchette générale des coûts de l'ensemble des ouvrages étudiés.
- Les coûts semblent bien maîtrisés car moins dispersés.

Le calcul des coûts des ouvrages en ligne par les formules paramétriques marque une avance sur les méthodes faisant appel aux prix moyens ou à une unité d'oeuvre unique. Certes, les analyses par régressions simples ou multiples ne peuvent pas totalement expliquer le phénomène complexe du coût d'un tunnel. Cependant, elles nous permettent de bien comprendre ce phénomène et elles donnent la "possibilité de prévoir". Toutefois leur emploi est plus complexe et leur fiabilité relative, les paramètres obtenus restant liés à l'observation étudiée. L'introduction de nouvelles opérations et de nouveaux ouvrages pourrait donc conduire à des résultats quelque peu différents.

X.3 - Les causes et les conséquences de l'évolution

X.3.1 - Les causes de l'évolution

Les causes de l'évolution des coûts ont été examinées dans cette recherche. Pour ces effets, on a utilisé 3 références: la structure des index nationaux pour la révision des prix des marchés de travaux publics de 1975 à 1990, les salaires des ouvriers dans les travaux publics de même époque, les prix de 40

matériaux de construction et de l'énergie et ils ont été analysés. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.

Tableau.X.6 - Comparaison de l'évolution des salaires d'ouvriers et les prix des matériaux (1975 à 1990)

Les coûts:	Par an	Moyenne de:
Matériaux de construction	+ 10,9 %	40 produits
Main d'oeuvre	+ 1,3 %	8 niveaux d'ouvriers
Tunnels métros urbains- En souterrain	- 3,5 %	32 ouvrages
Tunnels métros urbains- En tranchée couverte	- 4,0 %	43 ouvrages
Productivité du travail	+ 15 %	Travaux souterrains

Le tableau 6 montre que les salaires et les prix des matériaux ne sont pas la cause de la baisse du coût des tunnels. Bien au contraire, ils augmentent les coûts de tunnels.

Les analyses ont bien démontrés les 3 causes de l'évolution des coûts qui sont la diminution du volume de structure (m3), les progrès techniques et les expériences.

Les analyses ont montré que les tunnels ont été réalisés avec de moins en moins de béton dans le temps. Étant donnée que le volume de structure est un facteur significatif des coûts, on peut dire que la diminution du volume de structure constitue une des causes déterminantes pour la baisse des coûts. L'origine de cette évolution du volume de structure est: l'utilisation du béton de haute performance, l'emploi des voussoirs préfabriqués, les parois moulées, parois préfabriquées choisies pour les tunnels exécutés en tranchée couverte, les meilleurs profils de tunnel définis par des ingénieurs, les techniques d'exécution des travaux tel que le prédécoupage mécanique. En réalité, ce sont les progrès techniques qui font baisser les coûts.

Depuis une dizaine année, en France, dans le domaine de travaux souterrains, on est passé des méthodes traditionnelles aux méthodes modernes, notamment, les tunneliers sont de plus en plus utilisés.

La technologie des tunneliers constitue un progrès décisif dans le domaine de la construction souterraine. En effet, le tunnelier présente des avantages suivants: amélioration de la sécurité, diminution de main d'oeuvre, augmentation des cadences d'avancement. Le tunnelier fournit une possibilité de mécaniser l'excavation à l'abri d'une protection sûre permettant de franchir les contraintes géologiques et de rendre possible la solution du tunnel pratiquement dans tous les cas.

Les traitements modernes des terrains au moyen d'injections ont véritablement été mis au point en France. Ils ont constitué un progrès déterminant dans le domaine des travaux publics et tout particulièrement dans celui des travaux souterrains.

L'expérience des ingénieurs constitue un autre facteur déterminant pour la maîtrise du coût. Ce qui se traduit souvent dans le choix des méthodes d'exécution bien adaptées au projet, le choix optimal du profil d'ouvrage, l'organisation de chantier de travaux souterrains qui est très complexe, en particulier le chantier de tunnel construit avec le tunnelier fonctionne comme une chaîne d'usine.

Les résultats ont démontré une tendance de progrès de productivité du travail dans le secteur des travaux souterrains, soit 15% par an. Cela constitue sans doute un indicateur du progrès technique s'ajoutant aux économies des matières.

Les causes de l'évolution des coûts de tunnel sont nombreuses et difficiles à préciser. Les causes évoquées sont les principales et servent d'exemples.

X.3.2 - Les conséquences de l'évolution

Il est difficile d'apporter une réponse complète sur les conséquences de l'évolution des coûts, mais quelques axes ont été néanmoins présentées.

La baisse des coûts des tunnels permet à augmenter les travaux souterrains en substituant les infrastructures de surface en sous-sol. Cela peut avoir des conséquences positives, mais aussi des effets négatifs.

Pour les effets positifs, nous avons: augmentation de la mobilité (facteur décisif de la productivité et de fonctionnement d'une ville), utilisation du sous-sol, diminution de la congestion en surface, libération de l'espace au sol, protection de l'environnement, stimulation des recherches scientifiques, protection des équipements contre les agressions climatiques, défense-sécurité etc.

Les effets négatifs peuvent être les suivants: risque l'encombrement du sous-sol, dommage à l'environnement causés par les modification de terrain (risque de décompression, effets chimiques par le traitement de terrain, courants vagabonds à cause du barrage hydraulique), dégradation de l'environnement vis-à-vis des usagers (dénivelé, confinement, obscurité), dommage aux constructions existantes, difficulté pour la maintenance etc.

On remarque, avec les progrès techniques que la plupart des effets négatifs sont évitables ou réparables par des mesures nécessaires. Néanmoins, ce qui ne doit être pas une exclusivité des grandes opérations en souterrain, limiterait ainsi le confort des voyageurs et augmenterait le coût des stations et la difficulté de la maintenance.

X.4 - Les remarques et les perspectives

Après cette étude, quelques remarques supplémentaires apparaissent. Elles sont les suivantes:

- Il serait nécessaire d'établir une réglementation, par exemple, fixer les limites de profondeur, surtout pour les grandes opérations modernes qui

nécessitent des concentrations et des réservations. Ainsi, serait-il nécessaire d'établir un schéma d'aménagement du sous-sol pour les villes, par niveaux ou par regroupements des réseaux.

- La station profonde est onéreuse. Sur une ligne enterrée du métro, les coûts des stations représentent de 40 % à 60%, l'influence de tunnels profonds sur le coût des stations reste à démontrer.
- L'influence sur les coûts d'entretien, et sur la surveillance des tunnels réalisés avec les méthodes classiques ou avec les méthodes modernes reste à étudier.
- L'étude d'impact socio-économique des infrastructures en souterrain par rapport à des solutions à l'air libre apparaît pertinent.
- Face à un marché potentiel, il apparaît intéressant de standardiser des machines pour augmenter la production.

En ce qui concerne la recherche dans les travaux souterrains, après la recherche national "Tunnel 85-90" en France, les professionnels de travaux souterrains préparent un nouveau projet de recherche, baptisé "EUPALINOS". EUPALINOS était un architecte de la Grèce qui avait conçu et réalisé le premier vrai tunnel connu il y a donc 2500 ans (525 av.J.C.) à île de Samos. Le nouveau projet de recherche serait centré sur les problèmes rencontrés et créés lors de l'avancement de tunneliers dans un sol hétérogène.

Le groupe de travail N° 15 et de l'AITES continue la recherche dans le domaine économique des travaux souterrains.

Nous assistons en effet à une augmentation rapide des travaux souterrains. Si cette étude a apporté une contribution à la connaissance des coûts des tunnels, et a un intérêt pour la prévision de dépenses, en renforçant la confiance des

décideurs à l'égard des réalisateurs du projet, c'est grâce aux données soigneusement préparées par le groupe de travail N° 15. Cela montre bien que des informations intéressantes fournies par l'entreprise peuvent à leur tour, resservir l'entreprise.

Les références bibliographiques

Livres :

J.Mathivat et J.F.Bougard, "Procédés généraux de construction-3 Travaux souterrain"1985 Cours de l'Ecole Nationale des Ponts & Chaussées

Max Pietsch. 1963. *La révolution industrielle*, Petite Bibliothèque Payot. 218p.

Jean Fourastié. 1969-1970. "Le progrès technique et l'évolution économique." Université de Paris, Institut d'études politiques. Les cours de droit

Jean Jacques LAFONT. "Fondements de l'économie publiques"

Rémy Prud'homme et Terny,G.Le financement des équipements publics de demain" Economica, Paris 1986, 432p.

Rémy Prud'homme "Le ménagement de la nature, Dunod, Paris, 1980.

Darbéra,R. et Rémy Prud'homme, *Transports urbains et développement économique du Brésil*, Economica, Paris 1983, 160P.

Dominick Salvatore."Econométrie et statistique appliquées" 1985

"Tables statistiques" CERESTA(Centre d'Enseignement et de Recherche de Statistique Appliquée).1991

"Aide-mémoire pratique des techniques statistiques" CERESTA. 1991

"Approfondissement des techniques d'analyse des series chronologiques pour la prévision". CERESTA. 1991

Richard Darbéra et Rémy Prud'homme. "Transports dans les PVD" 1990-91

Rapports :

"La recherche d'économies dans les travaux souterrains" - Journées d'études internationales 10-14 mai 1981 Nice.

M.Francis KUHN, Mma.Christine MARTINET, M.Pierre MARX, M.Bernard CONSTANTIN. "Etude comparative des coûts de génie civil selon les systemes de transport adoptes" 30 Mai 1990

RATP, "Les tunnels du métro de Paris: techniques et matériels de construction" 53 TER Quai des grands-Augustins 75271 Paris

Articles:

Bernard Constantin & Michel Pérard. "Une meilleure connaissance des coûts, facteur de développement des tunnels routiers européens" *Franchissement souterrains pour l'Europe*, Legrand (ed.) 1990 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 6191 1575 P191-197

Jean-Paul GODARD, "Coûts des divers types d'infrastructures de transport ferroviaires en zones urbaine et suburbaine" *La recherche d'économies dans les travaux souterrains* - Journées d'études internationales 10-14 mai 1981 Nice.

Claude André LAMURE . 1992. "Transport terrestre et environnement des villes et des champs" . *Transports* N° 354, juillet-août 1992, pp. 207-216.

Lucien LUPIAC. 1980. "Devrions-nous éviter les transports en souterrain ?" *Tunnels* N° 38 Mars-Avril 1980. pp.119-129.

J. GUILLAUME. 1990. "Les tunneliers utilisés dans le cadre des grands franchissements européens: évolution récente et perspectives." *Tunnels et ouvrages souterrains*. N° 102 Nov-décembre 1990. pp.289-293.

Pierre DUFFAUT. 1990. "Ville, que fais-tu de ton sous-sol ?" Compte rendu de la table ronde organisée le 28 mai 1990 au Sénat par l'Association "Espace souterrain." *Tunnels et ouvrages souterrains* N° 102-Nov-Décembre 1990.pp.315-316.

R.WALDMANN. 1991. "Métros et villes millionnaires dans le monde" *Tunnels et ouvrages souterrains*. N° 105-Mai-Juin 1991. PP.125-149.

J. MATHIVAT, J.F. BOUGARD. "Procédés généraux de construction"

BEJUI HENRI "Creusement des tynnels en terrain meuble et aquifère" - *Tunnels et ouvages souterrains* N° 106, juillet-aout 1991, P. 191-194

LEMOINE BERTRAND "Le tunnel sous la Manche" - Paris, Editions du Moniteur, 1990

MAREC M. "Les tunnels urbains" - *Travaux* N°660, Déc. 1990 P. 37-40

PASCALE SAUVAGE "Sous la terrasse, l'autoroute ..." - *Le Monde* 06/07/1992

JEAN-MICHEL GRADT "Muse, premier système mixte de transport en souterrain" - *Le Moniteur* 17/07/1992

L. LI. "Nouvelles études pour la construction d'une rocade souterraine périphérique à Paris" - Les Echos 06/07/1992

J.F. BOUGARD "Tunnels en site urbain et économies liées à la mécanisation" - La recherche d'économies dans les travaux souterrains - Journées d'études internationales 10-14 mai 1981 Nice.

B. CONSTANTIN "Estimations prévisionnelles aux différents niveaux des études"

"Les tunnels du métro de Paris" - Techniques et matériels de construction - Document de la RATP

J. GUILLAUME " Les tunneliers utilisés dans le cadre des grands franchissements européens: Evolution récente et perspectives" - Tunnels et ouvrages souterrains N°102 Nov-Déc 1990

"Les facteurs de coût dans la construction des tunnels urbains" - Document de la RATP (traduction de Revue Die Strasse N° 80-439)

"La tonnelle" le fac-similé de l'édition originale de la plaquette imprimée en 1842 à l'occasion de la mise en service de : "la tonnelle" passage sous la Tamise à Londres. Le mot Tonnelle est à l'origine du mot Tunnel. - Tunnels N° 76 juillet-août 1986

"Choix d'un type de Tunnelier ou de Bouclier mécanisé" - Goupe de Travail N°4 d'AFTES. Tunnels N°76 1986

" Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble: du chantier à la théorie" Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées

M. BARBIER "Le sous-sol, composante essentielle de la politique de transport d'une mégalopole " - Journée d'étude CREPIF janvier 1988

F. BLENNEMANN "Cost-benefit approach and presentation of soution in the german federal republi" - Tunnels et ouvrages souterrains N° 98 Mars-avril 1990

Rémy Prud'homme et Sang Hyu Hwang "Economie d'échelle dans les transports par autobus à SEOUL, PUSANT ET SHANGHAI

Rémy Prud'homme "Fiscalité des transports urbains" Transports N°323 Mars 1987

Rémy Prud'homme et Terny,G.Le financement des équipements publics de demain" Economica, Paris 1986, 432p.

I.N.PLICHON, "Le tunnel d'Eupalinos" (525 av.J.C.)"

ANNEXES

ANNEXES AU CHAPITRE I

Annexe I.A - L'évolution des investissements dans les travaux publics en France

NATURE DES TRAVAUX REALISES EN METROPOLE

millions de francs courants

	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
ouvrages d'art, génie civil et structures métalliques	11 678	12 025	10 590	12 071	12 392	12 800	14 096	15 390	17 199	18 021	16 413
terrassements généraux	8 010	7 639	8 238	8 841	9 661	10 827	12 487	15 031	16 391	17 898	16 169
fondations spéciales, sondages, forages	1 756	1 905	2 051	2 156	2 277	2 357	2 377	2 733	3 289	3 859	3 845
travaux souterrains	2 072	1 855	1 651	1 472	1 581	2 422	2 806	3 748	5 339	6 395	7 413
travaux maritimes et fluviaux	1 334	1 116	1 159	1 008	1 224	1 406	1 541	1 644	1 617	1 562	1 291
travaux routiers	24 063	25 312	25 844	29 703	31 800	35 739	42 929	46 838	47 528	50 877	49 831
voies ferrées	1 633	1 811	1 644	1 799	1 949	1 679	1 802	1 774	1 785	2 164	2 577
adduction d'eau, assainissement, autres canalisations et installations	14 343	13 709	13 016	13 769	14 770	15 137	17 283	18 830	19 006	19 764	20 535
travaux électriques	16 438	17 567	18 107	20 995	22 853	24 244	25 016	28 062	29 843	30 027	28 671
ENSEMBLE	81 327	82 939	82 300	91 814	98 507	106 611	120 337	134 050	141 997	150 567	146 745

PART DE CHAQUE NATURE DE TRAVAUX DANS L'ACTIVITE

	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
ouvrages d'art, génie civil et structures métalliques	14,4%	14,5%	12,9%	13,1%	12,6%	12,0%	11,7%	11,5%	12,1%	12,0%	11,2%
terrassements généraux	9,8%	9,2%	10,0%	9,6%	9,8%	10,2%	10,4%	11,2%	11,5%	11,9%	11,0%
fondations spéciales, sondages, forages	2,2%	2,3%	2,5%	2,3%	2,3%	2,2%	2,0%	2,0%	2,3%	2,6%	2,6%
travaux souterrains	2,5%	2,2%	2,0%	1,6%	1,6%	2,3%	2,3%	2,8%	3,8%	4,2%	5,0%
travaux maritimes et fluviaux	1,6%	1,3%	1,4%	1,1%	1,2%	1,3%	1,3%	1,2%	1,1%	1,0%	0,9%
travaux routiers	28,7%	29,7%	31,4%	32,4%	32,3%	33,5%	35,7%	34,9%	35,0%	33,8%	34,0%
voies ferrées	2,0%	2,2%	2,0%	2,0%	2,0%	1,6%	1,5%	1,3%	1,3%	1,4%	1,8%
adduction d'eau, assainissement, autres canalisations et installations	17,6%	16,5%	15,8%	15,0%	15,0%	14,2%	14,4%	14,3%	14,1%	13,1%	14,0%
travaux électriques	20,2%	21,2%	22,0%	22,9%	23,2%	22,7%	20,8%	20,9%	21,0%	19,9%	19,5%
ENSEMBLE	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Source: Annuaire 1992 de la Fédération Nationale des Travaux Publics

ANNEXES AU CHAPITRE I

Annexe I. B - L'évolution d'activité dans les travaux publics en France

VARIATION DE L'ACTIVITE SELON LA NATURE DES TRAVAUX

francs courants

	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	moyenne annuelle 92/87
ouvrages d'art, génie civil et structures métalliques	0,8%	3,0%	-11,9%	14,0%	2,7%	3,3%	10,1%	11,8%	4,8%	-8,9%	5,1%
terrassements général	6,9%	-4,6%	7,8%	7,3%	9,3%	12,1%	15,3%	9,0%	9,2%	-9,7%	8,4%
fondations spéciales, sondages, forages	-1,7%	8,5%	7,7%	5,1%	5,6%	3,5%	0,8%	20,3%	17,3%	-0,4%	10,3%
travaux souterrains	3,7%	-10,5%	-11,0%	-10,8%	7,4%	53,2%	15,9%	42,4%	19,8%	15,9%	25,1%
travaux maritimes et fluviaux	-14,7%	-16,3%	3,9%	-13,0%	21,4%	14,9%	9,6%	-1,6%	-3,4%	-17,3%	-1,7%
travaux routiers	9,7%	5,0%	2,1%	14,9%	7,1%	12,4%	20,1%	1,5%	7,0%	-2,1%	6,9%
voies ferrées	-1,5%	10,9%	-0,2%	9,4%	9,3%	-13,9%	7,3%	0,6%	21,2%	19,1%	8,9%
adduction d'eau, assai- sissement, autres cana- lisations et installations	6,3%	-1,4%	6,1%	6,8%	7,3%	2,5%	14,1%	0,9%	4,0%	3,9%	6,3%
travaux électriques	7,0%	5,9%	1,1%	15,9%	8,8%	5,1%	3,2%	6,3%	0,6%	-4,5%	3,4%
ENSEMBLE	6,1%	2,0%	-0,8%	11,6%	7,3%	8,2%	12,9%	5,9%	6,0%	-2,5%	6,6%

VARIATION DE L'ACTIVITE SELON LA NATURE DES TRAVAUX

francs constants

	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	moyenne annuelle 92/87
ouvrages d'art, génie civil et structures métalliques	-5,5%	-18,0%	5,5%	3,6%	2,5%	7,1%	4,4%	8,2%	2,8%	-10,5%	3,0%
terrassements général	-12,5%	-0,7%	0,4%	10,3%	11,2%	12,2%	15,1%	8,5%	7,1%	-11,2%	6,1%
fondations spéciales, sondages, forages	-0,5%	-0,9%	1,7%	6,6%	2,7%	7,9%	10,6%	16,6%	15,1%	-2,1%	8,0%
travaux souterrains	-17,9%	-9,1%	-16,6%	8,4%	52,1%	2,7%	27,7%	37,9%	17,5%	13,9%	22,5%
travaux maritimes et fluviaux	-23,3%	-4,4%	-18,6%	22,6%	14,0%	6,6%	2,0%	-4,8%	-5,2%	-18,8%	-3,7%
travaux routiers	-3,5%	-6,0%	1,5%	8,1%	11,5%	16,8%	4,2%	-1,9%	-5,0%	-3,7%	4,7%
voies ferrées	1,7%	-16,4%	2,4%	9,3%	-14,5%	4,4%	-5,9%	-2,6%	18,9%	17,0%	6,7%
adduction d'eau, assai- sissement, autres cana- lisations et installations	-12,3%	-12,6%	-1,0%	8,3%	1,7%	1,0%	4,2%	-2,3%	2,0%	2,1%	4,1%
travaux électriques	-2,0%	-5,1%	8,5%	9,9%	5,3%	0,3%	7,3%	0,9%	-1,3%	-6,1%	1,3%
ENSEMBLE	-6,5%	-8,7%	4,4%	8,3%	7,4%	9,8%	6,5%	2,5%	4,0%	-4,2%	4,4%

Source: Annuaire 1992 de la Fédération Nationale des Travaux Publics

ANNEXES AU CHAPITRE II

Annexe II A- Note méthodologique de l'enquête de l'AFTES

AFTES011

Mars 1990

ASSOCIATION FRANCAISE
DES TRAVAUX EN SOUTERRAIN
(AFTES)

* *
*

GROUPE DE TRAVAIL N°15

"Coûts et avantages de la réalisation d'ouvrages en souterrain"

ETUDE DES COUTS DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORTS FERROVIAIRES EN ZONES URBAINE ET SUBURBAINE

Note méthodologique

L'étude concerne les opérations de réalisation d'infrastructures de transports ferroviaires en zones urbaine et suburbaine (lignes nouvelles ou extensions). L'analyse des coûts s'effectue à deux niveaux :

- coût global "d'opération",
- coût des "ouvrages".

Les notions "d'opération" et "d'ouvrages" sont définies et explicitées ci-après.

QUAND FOURNIR LES DONNEES ?

Il n'est pas nécessaire d'attendre le règlement définitif des marchés pour remplir les bordereaux de prise de données (on ne fait pas de la comptabilité, des ordres de grandeurs suffisent)

On peut donc fournir des "données intermédiaires", en le précisant, à certains stades significatifs des opérations :

- lors de l'approbation de l'APS.
- au niveau de l'APD,
- lorsque les marchés principaux ont été passés.

Le niveau de saisie des données sera précisé (voir bordereaux E1 et E2)

REFERENCE DES COUTS

Chaque Société fournira les coûts à une date de référence proche de la période de réalisation de l'opération (préciser l'année et le mois) ; une formule d'actualisation commune, applicable à l'ensemble des opérations "tous réseaux confondus", sera définie par le groupe.

La période de réalisation de l'opération sera elle-même saisie (voir Bordereau A), de manière à permettre des analyses de l'évolution des coûts des diverses natures d'ouvrages au cours du temps.

Un critère relatif à la "conjoncture" figure dans les bordereaux E1 et E2 de saisie des données ; ce critère sera à "3 niveaux" (conjoncture favorable, neutre, défavorable) et sa fixation sera bien sûr laissée à l'appréciation de chaque Société.

ANNEXES AU CHAPITRE II

Annexe II A- Note méthodologique de l'enquête de l'AFTES

DIFFUSION ET PUBLICATION DES RESULTATS DE L'ETUDE

L'ensemble de la base de données avec les "références réseaux" sera remise aux participants (disquette). Par contre, les publications se feront sans indication de "référence réseau".

* *
*

1-COUTS D'OPERATIONS

L'analyse porte exclusivement sur la "partie ligne" proprement dite des opérations de transports ferroviaires. Pour une opération donnée, l'étude ne prend donc pas en compte les équipements ou aménagements suivants :

- matériel roulant,
- systèmes embarqués : l'étude les prendra en compte lorsqu'il sera possible de les isoler du poste "matériel roulant" ; dans le cas contraire, mention sera faite de cette non prise en compte (voir poste "courants faibles" des bordereaux E1 et E2),
- zones de garages, autres que celles directement associées aux terminus des lignes, et utilisées également pour le retournement des trains,
- ateliers du matériel roulant,
- postes de commande centralisée,
- complexes de maintenance (services techniques des installations fixes),
- complexes socio-administratifs,
- gares routières ou points d'échanges conjugués aux gares ou stations,
- ouvrages de raccordement entre la ligne étudiée et :
 - * une autre ligne du même réseau,
 - * une zone de garages,
 - * un complexe de maintenance.

Les postes de dépenses à prendre en compte sont les suivants :

- ingénierie de maîtrise d'oeuvre, à l'exclusion des dépenses liées à l'exercice de la maîtrise d'ouvrage. Il convient donc de ne pas prendre en compte dans le coût des opérations certaines dépenses relatives notamment :
 - * à l'élaboration du "programme" de l'opération,
 - * aux études préliminaires précédant l'élaboration de l'APS (études de faisabilité, dossier de DUP, étude d'impact, enquête préalable,...),
 - * aux travaux de reconnaissances préliminaires (géologie, topographie,...) ;
- foncier,
- déplacements de réseaux, rétablissements et réfections de voirie, étant précisé que les "frais de voirie" (voir bordereaux E1 et E2) correspondent aux dépenses de rétablissement à l'identique après travaux ;
- aménagements de surface ou traitements paysagers réalisés à l'occasion de l'opération : ce poste correspond à une part "objective" des travaux d'accompagnement, dont l'appréciation incombe au maître d'ouvrage ;

ANNEXES AU CHAPITRE II

Annexe II A- Note méthodologique de l'enquête de l'AFTES

- génie-civil :
 - * gros-oeuvre proprement dit (structures),
 - * traitements de terrain ; ce poste comprend la totalité des cas de recours aux traitements de terrains : étanchement et/ou consolidation des terrains encaissants (en voûte, écrans périphériques, en radier), compensation des tassements,... Par contre, les injections dites "de collage" réalisées pour colmater les vides existant entre la structure des ouvrages et le terrain ne seront pas décomptées au titre des traitements de terrain, mais à celui du gros-oeuvre;
 - * aménagements de second-oeuvre,
- équipements fixes liés aux infrastructures :
 - * voie,
 - * équipements électromécaniques : appareils élévateurs et translateurs, équipements de ventilation/climatisation, équipements pour épuisement,...),
 - * péages et distributeurs de titres de transport,
 - * équipements électriques, systèmes d'exploitation, télécommunications,...

Pour chaque opération, il convient de remplir les Bordereaux suivants de prise de données :

- un Bordereau A, relatif à "l'identité" et aux caractéristiques générales de l'opération;
- un Bordereau E1, relatif au coût global de l'opération.

2-COUTS DES OUVRAGES

On distingue deux grandes classes d'ouvrages : les "ouvrages en ligne" et les stations (ou gare).

2.1 - ouvrages en ligne : on appelle "ouvrage en ligne" un tronçon de ligne à deux voies présentant des caractéristiques homogènes au plan :

- * du type d'infrastructure (tunnel foré, tranchée couverte, plateforme en déblai, au sol ou en remblai, viaduc,...),
- * du niveau moyen d'implantation (par convention : niveau des voies) par rapport au niveau du sol,
- * de la configuration géométrique (section transversale); à ce sujet, il conviendra de bien spécifier le caractère "monc-tube" ou "bitube" des tunnels;
- * des caractéristiques de l'environnement géologique et hydrogéologique,
- * des caractéristiques de l'urbanisation,
- * des méthodes d'exécution.

Remarques :

- a/ toute variation d'un des critères ci-dessus doit conduire à l'identification d'un nouvel ouvrage en ligne et, partant, faire l'objet d'une saisie d'informations spécifiques ; c'est ainsi qu'une même interstation pourra comporter plusieurs "ouvrages" ; par contre, plusieurs tronçons de ligne, situés dans des interstations différentes mais présentant des caractéristiques homogènes, pourront être regroupés dans un

ANNEXES AU CHAPITRE II

Annexe II A- Note méthodologique de l'enquête de l'AFTES

même "ouvrage", à condition toutefois qu'ils aient été réalisés au titre d'un même marché de travaux ;

b/le critère "méthodes d'exécution" n'est pris en compte que pour les ouvrages souterrains (réalisés "à ciel ouvert" ou "à l'avancement", voir bordereaux de saisie C et D) ; ce critère comporte plusieurs "sous-critères" ; chaque variation de l'un de ces sous-critères doit donc conduire à l'identification d'un nouvel ouvrage en ligne et, partant, faire l'objet d'une saisie d'informations spécifiques ;

c/les ouvrages annexes associés à la ligne (ouvrages de ventilation, ouvrages d'accès pour les secours, puits et rameaux de décompression, postes de redressement ou sous-stations) ne sont pas décomptés comme "ouvrages". Leurs coûts sont répartis sur les "ouvrages en ligne" de l'interstation concernée, proportionnellement à la longueur de ces ouvrages. Il en est de même, dans le cas des infrastructures établies à l'air libre, pour les ouvrages d'art de franchissement de la ligne.

2.2 - stations (ou gares), y compris leurs accès et les ouvrages annexes associés. Chaque station constitue un "ouvrage".

Remarque :

- dans les cas où les accès et/ou ouvrages annexes situés en dehors de la structure principale de la station représentent une quote-part importante de l'ensemble (en "volumes construits" et en coûts), ces accès et/ou ouvrages annexes seront traités à part. (Le Bordereau B de prise de données a été complété à cet effet).

Pour une opération donnée, ne seront pas pris en compte les ouvrages présentant de trop grandes particularités ou un caractère exceptionnel (cependant, les ouvrages spéciaux les plus significatifs, notamment ceux nécessités par la divergence ou le regroupement des voies principales, feront, dans toute la mesure du possible, l'objet d'une analyse spécifique). En conséquence, la somme des longueurs des ouvrages analysés pour une opération pourra être inférieure à la longueur de l'opération ; il en est de même pour les coûts, étant toutefois observé que la répartition de certains postes de dépenses (voir ci-après) proportionnellement à la longueur des ouvrages tiendra compte de la totalité des ouvrages, analysés ou non.

Pour chaque ouvrage, il convient de remplir les Bordereaux suivants de prise de données :

- un Bordereau B, relatif à "l'identité" et aux caractéristiques générales de l'ouvrage et de son environnement;
- un Bordereau E2, relatif au coût de l'ouvrage;
- un Bordereau C, pour les ouvrages souterrains réalisés en tranchée couverte;
- un Bordereau D, pour les ouvrages souterrains réalisés "à l'avancement", quelle que soit la méthode utilisée;

ANNEXES AU CHAPITRE II

Annexe II A- Note méthodologique de l'enquête de l'AFTES

Les principes suivants seront respectés en ce qui concerne la répartition de certains postes de dépenses sur le coût des ouvrages :

- ingénierie : le taux global (en %) constaté au niveau de l'opération sera appliqué de façon uniforme à chaque ouvrage ;
- foncier : à imputer aux ouvrages concernés ; en cas de difficulté, ventiler l'ensemble de ce poste sur un sous-ensemble d'ouvrages, voire sur l'ensemble des ouvrages de la ligne, proportionnellement aux longueurs des ouvrages ;
- déplacements de réseaux, réfection de voirie : même principe que pour le foncier ;
- aménagements de surface ou traitements paysagers réalisés à l'occasion de l'opération : à imputer aux ouvrages concernés ; en cas de difficulté, ventiler l'ensemble de ce poste sur un sous-ensemble d'ouvrages, voire sur l'ensemble des ouvrages de la ligne, proportionnellement aux longueurs des ouvrages.
- équipements fixes liés aux infrastructures :
 - * voie : imputer le montant global de ce poste aux ouvrages, proportionnellement à leurs longueurs (y compris les stations) ;
 - * appareils élévateurs et translateurs : imputer les coûts à chaque station concernée ;
 - * péages et distributeurs de titres de transport : imputer les coûts à chaque station concernée ;
 - * équipements de ventilation / climatisation / épuisement : imputer les coûts à chaque ouvrage concerné (éventuellement station) ;
 - * équipements électriques, systèmes d'exploitation, télécommunications, ... : imputer le montant global de ce poste aux ouvrages, proportionnellement à leurs longueurs (y compris les stations) ;

ANNEXES AU CHAPITRE II

Annexe II B - Bordereaux de saisie des données

CARACTÉRISTIQUES D'OUVRAGE		Codes
Désignation de l'ouvrage	Caractéristiques	Classification
Nature de l'ouvrage	1	1
Matériau	2	2
Classe d'infrastructure	3	3
Longueur de l'ouvrage (m)	4	4
Largeur de l'ouvrage (m)	5	5
Section entrecroisée	6	6
Section terrassée (franchée)	7	7
Volumé de structure mise en place	8	8
Niveau du rail par rapport au sol naturel (m)	9	9
Nombre de voies	10	10
Nombre de niveaux	11	11
Surface totale des différents niveaux	12	12
Urbanisation	13	13
Topologie	14	14
Topographie	15	15
Topologie	16	16
Nappe phréatique	17	17
État de la structure	18	18
Topologie	19	19
Topographie	20	20
Topologie	21	21
Topographie	22	22
Topologie	23	23
Topographie	24	24
Topologie	25	25
Topographie	26	26
Topologie	27	27
Topographie	28	28
Topologie	29	29
Topographie	30	30
Topologie	31	31
Topographie	32	32
Topologie	33	33
Topographie	34	34
Topologie	35	35
Topographie	36	36
Topologie	37	37
Topographie	38	38
Topologie	39	39
Topographie	40	40
Topologie	41	41
Topographie	42	42
Topologie	43	43
Topographie	44	44
Topologie	45	45
Topographie	46	46
Topologie	47	47
Topographie	48	48
Topologie	49	49
Topographie	50	50
Topologie	51	51
Topographie	52	52
Topologie	53	53
Topographie	54	54
Topologie	55	55
Topographie	56	56
Topologie	57	57
Topographie	58	58
Topologie	59	59
Topographie	60	60
Topologie	61	61
Topographie	62	62
Topologie	63	63
Topographie	64	64
Topologie	65	65
Topographie	66	66
Topologie	67	67
Topographie	68	68
Topologie	69	69
Topographie	70	70
Topologie	71	71
Topographie	72	72
Topologie	73	73
Topographie	74	74
Topologie	75	75
Topographie	76	76
Topologie	77	77
Topographie	78	78
Topologie	79	79
Topographie	80	80
Topologie	81	81
Topographie	82	82
Topologie	83	83
Topographie	84	84
Topologie	85	85
Topographie	86	86
Topologie	87	87
Topographie	88	88
Topologie	89	89
Topographie	90	90
Topologie	91	91
Topographie	92	92
Topologie	93	93
Topographie	94	94
Topologie	95	95
Topographie	96	96
Topologie	97	97
Topographie	98	98
Topologie	99	99
Topographie	100	100

ARTES						BREVET DE CONDUITE D'APPAREILS A L'ENERGIE ELECTRIQUE (A)	
OPERATION						COSTE	
Libellé opération						Quantité	
Ville	Date	N°	Catégorie	Contenu			
Société							
Type de transport							
Période de réalisation							
Gabarit matériel roulant (m)							
Nature de la ligne							
Longueur totale des ouvrages pris en compte							
Longueur totale hors stations							
Répartition de la longueur totale par classes d'infrastructure (en %)							
Nombre de stations							
Longueur des stations (équival. m)							

ANNEXES AU CHAPITRE II

Annexe II B - Bordereaux de saisie des données

AFTES Groupe de travail
BORDEREAU DE SAISIE DES DONNEES (C)
Étude des coûts des métiers français

MÉTHODES D'EXÉCUTION A CIEL COUVERT

Critères	Codes Système Cotation Cotation	Qualification
Blindage périphérique		
✓ Éclairage	1	
✓ Blindage radio	2	
✓ Protection	3	
✓ Protection des données	4	
✓ Protection des données	5	
✓ Protection des données	6	
Mesures vis à vis de la présence de la nappe phéatique		
✓ Mesure	1	
✓ Mesure	2	
✓ Mesure	3	
✓ Mesure	4	
✓ Mesure	5	
✓ Mesure	6	
Soulèvement		
✓ Pas de soulèvement	1	
✓ Pas de soulèvement	2	
✓ Pas de soulèvement	3	
✓ Pas de soulèvement	4	
✓ Pas de soulèvement	5	
✓ Pas de soulèvement	6	
Terrassement		
✓ Terrassement	1	
✓ Terrassement	2	
✓ Terrassement	3	
✓ Terrassement	4	
✓ Terrassement	5	
✓ Terrassement	6	

AFTES Groupe de travail
BORDEREAU DE SAISIE DES DONNEES (D)
Étude des coûts des métiers français

MÉTHODES D'EXÉCUTION EN SOUERRAIN

Critères	Codes Système Cotation Cotation	Qualification
Mode d'attaque		
Pierre soignée	1	
Pierre d'attaque soignée	2	
Pierre d'attaque soignée	3	
Pierre d'attaque soignée	4	
Traitement de terrain		
Pas de traitement	1	
Traitement de terrain	2	
Traitement de terrain	3	
Traitement de terrain	4	
Traitement de terrain	5	
Traitement de terrain	6	
Soulèvement		
Pas de soulèvement	1	
Pas de soulèvement	2	
Pas de soulèvement	3	
Pas de soulèvement	4	
Pas de soulèvement	5	
Pas de soulèvement	6	
Terrassement		
Pas de terrassement	1	
Pas de terrassement	2	
Pas de terrassement	3	
Pas de terrassement	4	
Pas de terrassement	5	
Pas de terrassement	6	

Annexe II B - Bordereaux de saisie des données

COUT D'OUVRAGE		Cout Liquide L.F.T.
Ventilation du coût total		
Ingénierie (hors maîtrise d'ouvrage)		
Foncier		
Déplacement de réseaux, frais de voirie		
Aménagements de surface		
Génie civil		
Equipements		
Divers		
Cout total		

Code Spécification		Montant HT Chiffres de francs
Ventilation du coût total		
Ingénierie (hors maîtrise d'ouvrage)		
Foncier		
Déplacement de réseaux, frais de voirie		
Aménagements de surface		
Génie civil		
Equipements		
Divers		
Coût total		
Références : voir état des lieux annexes		
Fait à Paris le 10/05/2010		
Signature : [Signature]		
Nom : [Nom]		
Fonction : [Fonction]		
Coût total		

ANNEXE AU CHAPITRE II

Annexe II C- Liste générale des opérations

LILLE - Métro

- Ligne N°1
- Ligne N°1 bis

PARIS (RATP)- métro

- Ligne N°5, prolongement d'EGLISE DE PANTIN à BOBIGNY
- Ligne N°7, prolongement de PORTE DE LA VILLETTE à LA COURNEUVE
- Ligne N°7 prolongement de MAISON BLANCHE à VILLEJUIF
- Ligne N°13, prolongement de CARREFOUR PLAÉYEL à SAINT-DENIS
- Ligne N°13 bis, prolongement de PORTE DE CLICHY à ASMIERES
- Ligne N°10, prolongement de PORTE D'AUTEUIL à BOULOGNE (PONT DE SAINT-CLOUD)
- Ligne N°13, jonction de MIROMESNIL à INVALIDES

LYON (SEMALY)-METRO

- Ligne B, prolongement de PART-DIEU à JEAN MACE
- Ligne C, prolongement de CROIX PAQUET à HOTEL DE VILLE
- Ligne D, tronçon de VENISSIEUX à GORGE DU LOUP
- Ligne A, tronçon de PERRACHE à LAURENT BONNEVAY et ligne B, tronçon de CHARPENNES à PART DIEU

MARSEILLE (SMM)-METRO

- Ligne N°1, tronçon de CASTELLANE à LA ROSE
- Ligne N°2, tronçon de CASTELLANE à LA JOLIETTE
- Ligne N°1, prolongement de CASTELLANE à LA TIMONE
- Ligne N°2, prolongement de LA JOLIETTE à BOUGAINVILLE
- Ligne N°2, prolongement de BOUGAINVILLE à MADRAGUE VILLE
- Ligne N°2, prolongement de CASTELLANE à SAINTE MARGUERITE DROMEL

REGION ILE DE FRANCE (RAT)-RER

- Ligne A, prolongement de VINCENNES à NOISY LE GRAND
- Ligne A, prolongement de NOISY LE GRAND (MONT D'EST) à TORCY
- Ligne A, jonction d'AUBER à NATION
- Ligne B, prolongement de LUXEMBOURG à CHATELET
- Ligne B, jonction de CHATELET à GARE DU NORD

ANNEXE AU CHAPITRE II

Annexe II D- Liste des chantiers visités

TUNNEL SOUS LA MANCHE Le 20 Décembre 1990 coordonnée par M.BOUILLOT (T.M.L.)

STATIONS EN CONSTRUCTION DE LA LIGNE 2 DU METRO DE LILLE ET CHANTIER DE MONTAGE D'UN TUNNELIER. Le 24 Juin 1992 à Lille organisés par le groupe de travail N°15 de l'AFTES.

CHANTIER DE TRAITEMENT DE TERRAIN DE LA LIGNE "EOLE" à Paris le 6 Juillet 1992 organisé M. Maurice Guillaud, directeur techniques de SOLETANCHE
METEOR (METro Est-Ouest Rapide)

CHANTIER DU TUNNEL DE "METEOR"(METro Est-Ouest Rapide) le 19 Mai 1993 avec la Mission de hauts responsables de Beijing.

CHANTIER DU TUNNEL "PRADO-CARENAGE" Le 8 Octobre 1992 à Marseille, organisé par le groupe de travail N°15 de l'AFTES en collaboration avec la Société du Métro de Marseille.

CHANTIER DU TUNNEL DE PROLONGEMENT DE LA LIGNE D DU METRO DE LYON Le 18 Mai 1993 organisé par SEMALY avec la délégation de la Municipalité de Beijing concernant la construction du métro.

AÉROPORT T.G.V. RER CONNECTION, le 20 Décembre 1992, organisé par DAI du Ministère des équipements et de logements de France lors de la visite du ministre de Chemin de Fer de Chine à Paris

ANNEXE AU CHAPITRE II

Annexe II E- Liste des spécialistes contactés

Jean-François Bougard, vice-président de AITES (Association Internationale pour les Travaux en Souterrain): Directeur du Département des Infrastructures et Aménagements de la RATP

Jean Paul Godard, animateur du groupe de travail N° 15 de l'AFTES (Association Française des Travaux en Souterrain): Responsable du Service Management des Projets du Département des Infrastructures et Aménagements de la RATP

M.Bouillot, Chef du Secteur Techniques Transmanche Link(T.M.L.)

Henri BEJUI, Vice président de l'AFTES, Directeur du projet National TUNNEL 85-90, Ingénieur ETP

Jacques LARAVOIRE, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Chef de la Mission de la Recherche, de la Réglementation technique et de la Normalisation du Ministère de l'Equipement de France

Maurice GUILLAUD, Ingénieur civil, Vice-président international développement de SOLETANCHE

Bernard LABEE, Statisticien, Directeur du cabinet statistique

M. SIMONY, vice-président de SOFRETU, pour son aide au début des mon séjours en France et son aide familiale.

ANNEXES AU CHAPITRE III

Annexe III A - Coûts des tunnels de métros urbains

Exécutés en souterrain

Répartition selon les postes de dépense

(En mille F constants par mètre linéaire; Valeurs triées par années)

Année	Locali	Lon/m	Tt	Go	Dr	Af	In	So	Voie	Vcé	Cfo	Cfa	Diver	Total
1975	Paris	958	10,4	146,0	21,7	1,5	31,2	0,0	11,3	1,2	14,7	14,7	1,5	254,3
1975	Provin	3534	10,9	120,2	2,1	7,5	12,5	3,6	19,5	1,7	14,9	14,0	3,6	210,5
1975	Provin	470	0,0	142,8	2,0	0,0	12,8	3,6	19,4	1,8	14,8	14,1	3,8	215,2
1975	provin	324	0,0	207,2	3,0	0,0	18,5	5,2	28,2	2,6	21,5	20,4	5,6	312,1
1977	Paris	374	19,8	187,6	0,0	0,0	38,2	0,0	18,4	1,4	17,7	23,2	5,5	311,8
1979	Paris	394	6,5	146,5	39,3	32,3	36,1	0,5	10,2	1,6	11,3	9,2	1,1	294,6
1980	Paris	244	31,3	144,8	7,0	1,6	34,4	2,3	17,2	0,8	18,0	20,4	3,9	281,8
1980	Paris	1016	25,8	133,3	4,9	1,9	31,8	2,3	16,0	0,9	17,7	20,7	3,9	259,0
1982	Provin	1400	0,0	128,2	0,0	10,2	46,8	0,0	28,8	4,6	2,1	13,6	36,6	270,9
1982	Provin	2500	0,0	102,5	35,0	3,2	49,6	0,0	15,0	0,9	1,8	10,7	34,8	253,5
1982	Paris	159	0,0	116,1	25,6	5,5	26,5	0,9	9,1	1,8	11,0	15,5	5,5	217,5
1982	Paris	72	0,0	137,3	30,3	6,1	30,3	2,0	10,1	2,0	12,1	16,1	6,1	252,3
1982	Paris	463	0,0	88,5	19,8	5,0	22,3	1,3	9,4	2,2	10,7	15,4	5,3	179,9
1982	Paris	190	53,5	88,7	19,9	5,4	29,8	1,5	9,2	2,3	10,7	15,3	5,4	241,7
1984	Paris	75	20,5	83,6	3,4	13,6	29,0	3,4	17,1	0,0	23,9	20,5	1,7	216,7
1984	Paris	171	23,9	77,8	3,7	13,5	27,7	3,0	16,5	0,7	23,9	20,2	1,5	212,5
1984	Provin	1180	5,3	74,8	0,4	0,0	8,0	0,4	23,3	1,3	7,0	0,0	0,0	120,4
1985	Provin	2168	19,1	99,5	1,3	0,0	13,0	1,3	22,2	1,8	6,8	0,0	0,0	165,0
1985	Provin	1098	10,3	94,8	2,0	0,0	11,5	0,1	23,3	1,2	2,3	0,0	0,0	145,5
1985	Provin	1522	67,2	74,0	16,9	0,0	25,2	2,4	19,3	0,8	9,9	3,8	0,0	219,5
1985	Provin	1173	86,7	84,8	19,4	0,0	25,2	2,7	19,7	1,2	9,8	3,8	0,0	253,2
1985	Provin	878	69,4	103,4	16,7	0,0	25,2	3,0	19,4	1,4	10,0	4,0	0,0	252,4
1985	Provin	1026	72,6	93,8	11,4	0,0	25,2	2,8	19,4	0,9	9,9	4,0	0,0	240,0
1985	Provin	768	0,9	78,5	1,7	0,0	13,9	2,3	25,3	0,8	8,4	8,8	0,0	140,7
1985	Provin	3263	0,0	85,3	3,7	0,0	14,8	2,3	25,4	0,9	8,5	8,8	0,0	149,6
1985	Provin	1133	70,2	63,0	4,8	0,0	20,2	2,1	25,3	1,1	8,5	8,8	0,0	203,9
1985	Provin	826	8,9	172,7	0,5	0,0	25,3	2,3	25,3	1,3	8,4	8,7	0,0	260,6
1985	Provin	1307	0,0	93,8	1,6	0,0	8,9	0,5	20,6	1,9	12,0	0,0	0,0	139,3
1986	Provin	261	0,0	84,8	0,0	0,0	8,6	0,0	24,8	1,7	8,6	0,0	0,0	128,4
1986	Provin	357	0,0	91,4	0,0	0,0	9,4	0,0	25,0	1,9	8,8	0,0	0,0	136,5
1986	Provin	283	15,0	96,3	0,8	0,0	10,3	0,0	25,3	1,6	8,7	0,0	0,0	157,9
1989	Provin	1224	0,0	130,4	2,7	0,0	6,9	0,0	8,2	0,0	3,4	0,8	12,6	165,0

Note: Tt= Traitement de terrain; Go= Gros oeuvre proprement dit; Dr= Déviation des réseaux;

Af= Acquisition de foncier; So= Second oeuvre; Ingé= Ingénierie;

Vcé= Ventilation, climatisation, épaissements; Cfo= Courants forts; Cfa= Courants faibles.

ANNEXES AU CHAPITRE III

Annexe III B - Coûts des tunnels de métros urbains

Exécutés en souterrain

Répartition en % selon les postes de dépense

Année	Locali	lon/m	Tt	Go	Dr	Af	Ingé	So	Voie	Vcé	Cfo	Cfa	Diver
1975	Paris	958	4,1	57,4	8,5	0,6	12,3	0,0	4,5	0,5	5,8	5,8	0,6
1975	Provin	3534	5,2	57,1	1,0	3,6	5,9	1,7	9,3	0,8	7,1	6,6	1,7
1975	Provin	470	0,0	66,4	1,0	0,0	5,9	1,7	9,0	0,8	6,9	6,5	1,8
1975	provin	324	0,0	66,4	1,0	0,0	5,9	1,7	9,0	0,8	6,9	6,5	1,8
1977	Paris	374	6,3	60,2	0,0	0,0	12,3	0,0	5,9	0,4	5,7	7,4	1,8
1979	Paris	394	2,2	49,7	13,3	11,0	12,2	0,2	3,5	0,5	3,8	3,1	0,4
1980	Paris	244	11,1	51,4	2,5	0,6	12,2	0,8	6,1	0,3	6,4	7,2	1,4
1980	Paris	1016	9,9	51,5	1,9	0,7	12,3	0,9	6,2	0,4	6,8	8,0	1,5
1982	Provin	1400	0,0	47,3	0,0	3,8	17,3	0,0	10,6	1,7	0,8	5,0	13,5
1982	Provin	2500	0,0	40,4	13,8	1,3	19,6	0,0	5,9	0,4	0,7	4,2	13,7
1982	Paris	159	0,0	53,4	11,8	2,5	12,2	0,4	4,2	0,8	5,0	7,1	2,5
1982	Paris	72	0,0	54,4	12,0	2,4	12,0	0,8	4,0	0,8	4,8	6,4	2,4
1982	Paris	463	0,0	49,2	11,0	2,8	12,4	0,7	5,2	1,2	5,9	8,6	3,0
1982	Paris	190	22,2	36,7	8,2	2,2	12,3	0,6	3,8	0,9	4,4	6,3	2,2
1984	Paris	75	9,4	38,6	1,6	6,3	13,4	1,6	7,9	0,0	11,0	9,4	0,8
1984	Paris	171	11,3	36,6	1,8	6,3	13,0	1,4	7,7	0,4	11,3	9,5	0,7
1984	Provin	1180	4,4	62,1	0,3	0,0	6,6	0,3	19,3	1,1	5,8	0,0	0,0
1985	Provin	2168	11,6	60,3	0,8	0,0	7,9	0,8	13,4	1,1	4,1	0,0	0,0
1985	Provin	1098	7,1	65,2	1,4	0,0	7,9	0,1	16,0	0,8	1,6	0,0	0,0
1985	Provin	1522	30,6	33,7	7,7	0,0	11,5	1,1	8,8	0,4	4,5	1,7	0,0
1985	Provin	1173	34,2	33,5	7,6	0,0	9,9	1,1	7,8	0,5	3,9	1,5	0,0
1985	Provin	878	27,5	41,0	6,6	0,0	10,0	1,2	7,7	0,5	4,0	1,6	0,0
1985	Provin	1026	30,2	39,1	4,7	0,0	10,5	1,2	8,1	0,4	4,1	1,7	0,0
1985	Provin	768	0,7	55,8	1,2	0,0	9,9	1,7	18,0	0,6	6,0	6,2	0,0
1985	Provin	3263	0,0	57,0	2,5	0,0	9,9	1,5	16,9	0,6	5,7	5,9	0,0
1985	Provin	1133	34,4	30,9	2,3	0,0	9,9	1,0	12,4	0,5	4,2	4,3	0,0
1985	Provin	826	3,4	66,3	2,5	0,0	10,1	0,9	9,7	0,5	3,2	3,3	0,0
1985	Provin	1307	0,0	67,3	1,2	0,0	6,4	0,4	14,8	1,3	8,6	0,0	0,0
1986	Provin	261	0,0	66,0	0,0	0,0	6,7	0,0	19,3	1,3	6,7	0,0	0,0
1986	Provin	357	0,0	67,0	0,0	0,0	6,9	0,0	18,3	1,4	6,4	0,0	0,0
1986	Provin	283	9,5	61,0	0,5	0,0	6,5	0,0	16,0	1,0	5,5	0,0	0,0
1989	Provin	1224	0,0	79,0	1,6	0,0	4,2	0,0	5,0	0,0	2,0	0,5	7,6

Note: Tt= Traitement de terrain; Go= Gros oeuvre proprement dit; Dr= Déviation des reseaux;

Af= Acquisition de foncier; So= Second oeuvre; Ingé= Ingénierie;

Vcé= Ventilation, climatisation, épaissements; Cfo= Courants forts; Cfa= Courants faibles.

ANNEXES AU CHAPITRE III

Annexe III C - Coûts des tunnels de métros urbains

Exécutés en souterrain

Coûts et % des postes de dépense important

(En mille F constants par mètre linéaire)

Année	Localité	Lon/m	Hors équipe	% Hors équipe	Equipement	% Equipem	Total
1975	Paris	958	204,7	80,5	47,8	18,8	254,3
1975	Provin	3534	153,4	72,9	53,3	25,3	210,5
1975	Provin	470	157,8	73,4	53,2	24,7	215,2
1975	provin	324	229,0	73,4	77,2	24,7	312,1
1977	Paris	374	236,4	75,8	69,2	22,2	311,8
1979	Paris	394	256,6	87,1	36,8	12,5	294,6
1980	Paris	244	213,1	75,6	64,2	22,8	281,8
1980	Paris	1016	191,5	73,9	63,0	24,3	259,0
1982	Provin	1400	167,3	61,8	59,3	21,9	270,9
1982	Provin	2500	174,9	69,0	35,4	14,0	253,5
1982	Paris	159	168,6	77,5	42,7	19,6	217,5
1982	Paris	72	199,6	79,1	45,9	18,2	252,3
1982	Paris	463	130,8	72,7	43,0	23,9	179,9
1982	Paris	190	192,8	79,8	42,3	17,7	241,7
1984	Paris	75	143,8	66,4	70,3	32,7	216,7
1984	Paris	171	140,2	66,0	70,5	33,2	212,5
1984	Provin	1180	86,6	71,9	33,3	28,1	120,4
1985	Provin	2168	131,7	79,8	33,4	20,2	165,0
1985	Provin	1098	116,4	80,0	29,1	20,0	145,5
1985	Provin	1522	181,4	82,6	38,1	17,4	219,5
1985	Provin	1173	214,9	84,9	38,3	15,1	253,2
1985	Provin	873	213,8	84,7	38,6	15,3	252,4
1985	Provin	1026	201,7	84,0	38,3	16,0	240,0
1985	Provin	768	92,7	65,8	48,1	34,2	140,7
1985	Provin	3263	101,2	67,7	48,4	32,3	149,6
1985	Provin	1133	155,5	76,2	48,5	23,8	203,9
1985	Provin	826	211,9	81,3	48,7	18,7	260,6
1985	Provin	1307	102,5	73,5	36,9	26,5	139,3
1986	Provin	261	90,8	70,7	37,6	29,3	128,4
1986	Provin	357	98,1	71,9	38,3	28,1	136,5
1986	Provin	283	119,9	75,9	38,0	24,1	157,9
1989	Provin	1224	138,9	84,1	13,0	7,9	165,0

Note:

-Coûts hors équipements comportent les postes de dépenses:

Traitement de terrain; Gros oeuvre proprement dit; Déviation des réseaux;

Acquisition de foncier; Second oeuvre;

-Coûts des équipements comportent les postes de dépenses:

Ventilation, climatisation, épuisements; Courants forts; Courants faibles

-Le coût d'ingénierie est réparti sur chaque poste

ANNEXES AU CHAPITRE III

Annexe III D - Tunnels de métros urbains Exécutés en souterrain

Coûts hors équipements et caractéristiques des travaux

(Triés par coûts décroissants en Mille F constants par mètre linéaire)

Coûts	m	Lc	An	Ov	St	Vs	Pf	Ub	Hi	Gé	Tr	Tt	Ms
256,6	394	pa	79	8,6	58	36	-10	pu	0	Gb	Mp	Ts	Ci
236,4	374	pa	77	7,1	67	24	-14	cv	5	Gb	Tm	Ts	Ci
229,4	324	pv	75	9,6	54	15	-18	cv	18	Gb	Tm	Ts	Ci
214,9	1173	pv	85	6,5	44	14	-19	cv	19	Gf	Mp	Ts	Ci
213,2	244	pa	80	8,6	62	26	-9	pu	3	Gb	Tm	Tf	Ci
213,8	878	pv	85	6,5	44	14	-15	cv	15	Gb	Mp	Ts	pr
211,9	826	pv	85	6,8	44	13	-14	cv	12	Gb	Mf	Ts	pd
204,7	958	pa	75	7,1	57	26	-14	pu	3	Gb	Mp	Ts	Ci
201,7	1026	pv	85	6,5	44	14	-9	pu	15	Gb	Mf	Ts	pr
199,6	72	pa	82	9,6	70	32	-11	pu	0	Gb	Mp	pt	Ci
192,8	190	pa	82	7,1	62	21	-14	pu	0	Gb	Mp	Ts	Ci
191,5	1016	pa	80	7,1	58	22	-13	pu	3	Gf	Mp	Ts	pr
181,4	1522	pv	85	6,5	44	14	-16	pu	18	Gb	Mp	Ts	Ci
174,9	1250	pv	82	10,8	66	22	-15	cv	15	Gs	Mf	pt	pd
168,6	159	pa	82	9,4	56	22	-11	pu	0	Gb	Mp	pt	Ci
167,3	1400	pv	82	8,6	62	21	-15	uf	0	Gb	Ex	pt	bp
157,8	470	pv	75	10,5	85	26	-16	cv	12	Gb	Mp	pt	pd
155,5	1133	pv	85	6,5	44	13	-15	pu	11	Gb	Mp	Ts	Ci
153,4	3534	pv	75	9,6	52	11	-21	cv	15	Gb	Mp	Ds	pd
143,8	75	pa	84	7,1	57	26	-12	pu	10	Gf	Mp	Ts	Ci
138,9	1224	pv	89	7,2	50	9	18	cv	18	Gs	Mf	pt	tub
140,2	171	pa	84	7,1	55	22	-13	pu	10	Gf	Mp	Ts	Ci
131,2	2168	pv	85	10	54	12,4	-20	cv	10	Gf	Mp	Ts	Ci
130,7	463	pa	82	7,1	62	21	-12	pu	0	Gb	Mp	pt	Ci
119,9	283	pv	86	7,6	48	13	-15	pu	13	Gb	Mp	Ds	Ci
116,4	1098	pv	85	7,9	53	13,2	-16	cv	10	Gb	Mp	Ts	Ci
102,5	1307	pv	85	8,0	50	12	-18	cv	14	Gb	Mp	Ts	Ci
101,2	3263	pv	85	6,8	45	13	-13	cv	8	Gf	Mf	pt	pd
98,2	357	pv	86	8,1	52	13	-18	pu	13	Gb	Ex	Ds	Ci
90,8	261	pv	86	7,6	48	12	-30	pu	25	Gb	Ex	Ds	Ci
92,7	768	pv	85	6,5	44	13	-15	pu	0	Gf	Mp	pt	Ci
86,6	1180	pv	84	7,6	48	12	-19	pu	13	Gb	Mp	Ts	Ci

Note: La signification des abréviations du tableau:

Lc=Localité; pa:Paris; pv:province;

St= Section terrassée(M2);

Ov= Ouverture intérieure du tunnel(m);

Vs= Volume de structure(m3/mètre linéaire);

Pf= Profondeur du rail par rapport au sol naturel(m);

Ub= Urbanisation: (cv)= centre ville; (pu)= périphérie urbaine; (uf)= urbanisation faible;

Hi= Hauteur immergée (m). (hauteur moyenne de la nappe au dessus du fond de fouille),

Gé= Géologie: (Gb)=bonne cohésion ou roche; (Gf)=faible cohésion; (Gs)=sans cohésion;

Tr= Méthodes de terrassement: (Mp)= machine à attaque ponctuelle; (Tm): terrassement manuel;

(Mf). machine à forer pleine section; (Ex). emploi de l'explosif

Tt= Traitement de terrain: (Ts)=traitement depuis la surface; (pt)=pas de traitement; (Ds)=divers;

(Tf)=Traitement à partir du front de taille;

Ms= Méthodes de soutènement: (Ci)=cintre+planches de blindage;

(bp)=béton projeté; (pd)= procédés divers; (pr)=prévoûte;

ANNEXES AU CHAPITRE III

Annexe III E- Coûts des tunnels de métros urbains -Exécution en souterrain - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fig. III E-1. Coût en fonction de la profondeur en m

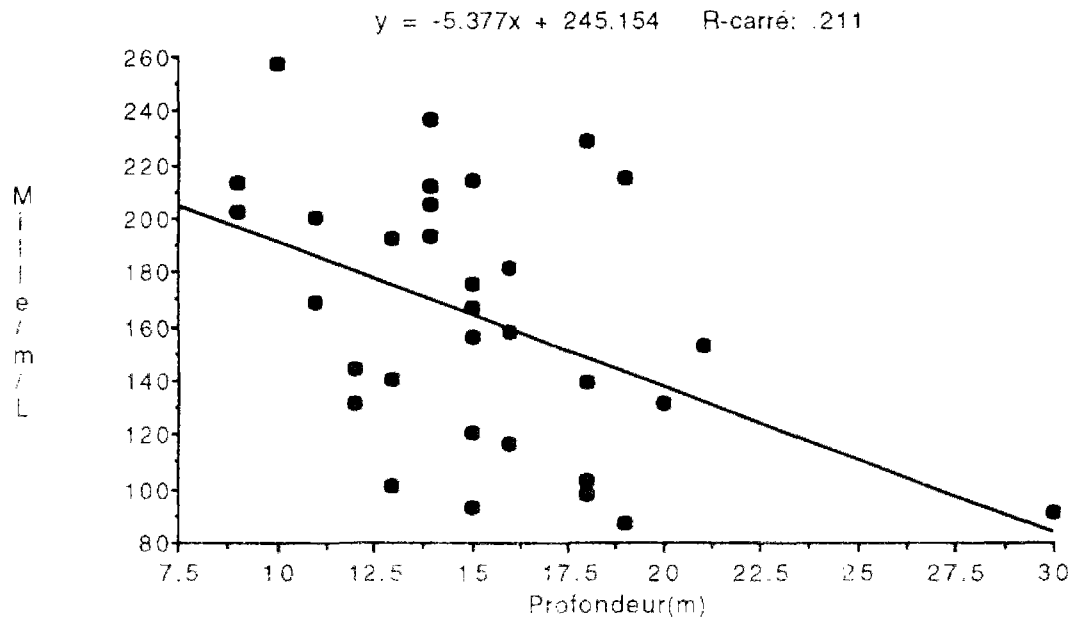
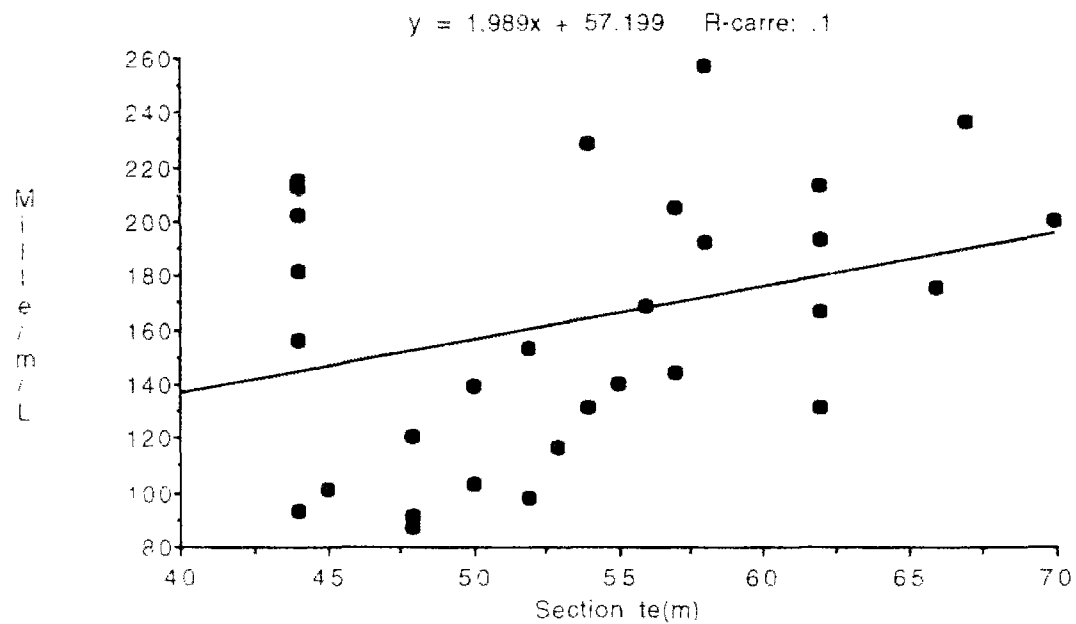


Fig. III E-2. Coût en fonction de la section terrassée en m²



ANNEXES AU CHAPITRE III

Annexe III E- Coûts des tunnels de métros urbains -Exécution en souterrain - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fig. III E-3. Coût en fonction de l'ouverture de tunnel en m

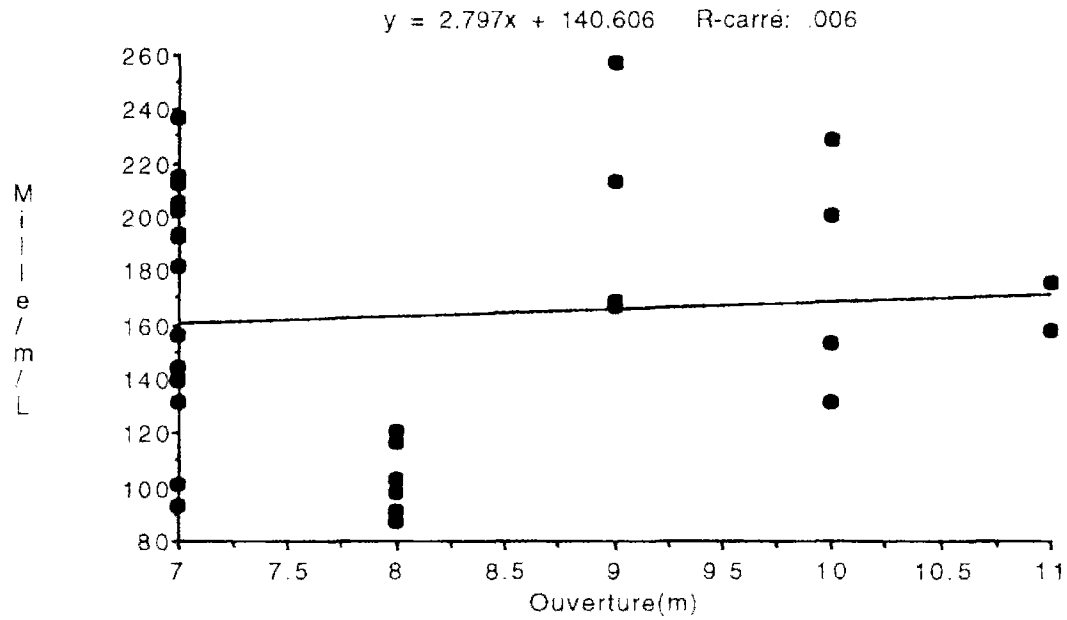
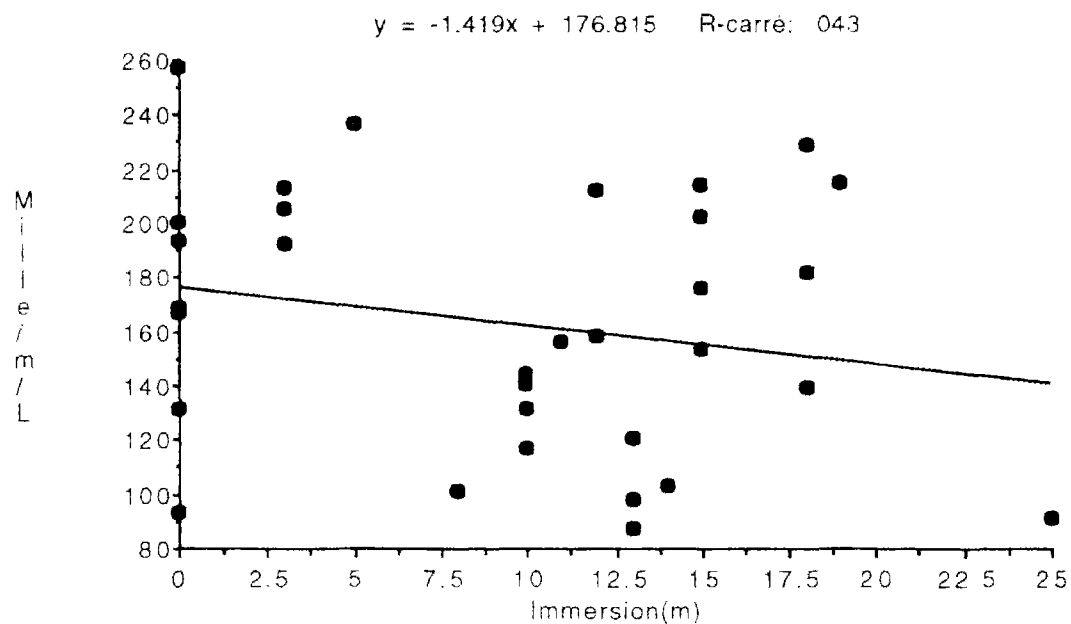


Fig. III E-4. Coût en fonction de l'immersion



ANNEXES AU CHAPITRE III

Annexe III E- Coûts des tunnels de métros urbains -Exécution en souterrain - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fig. III E-5: Coût en fonction de l'urbanisation

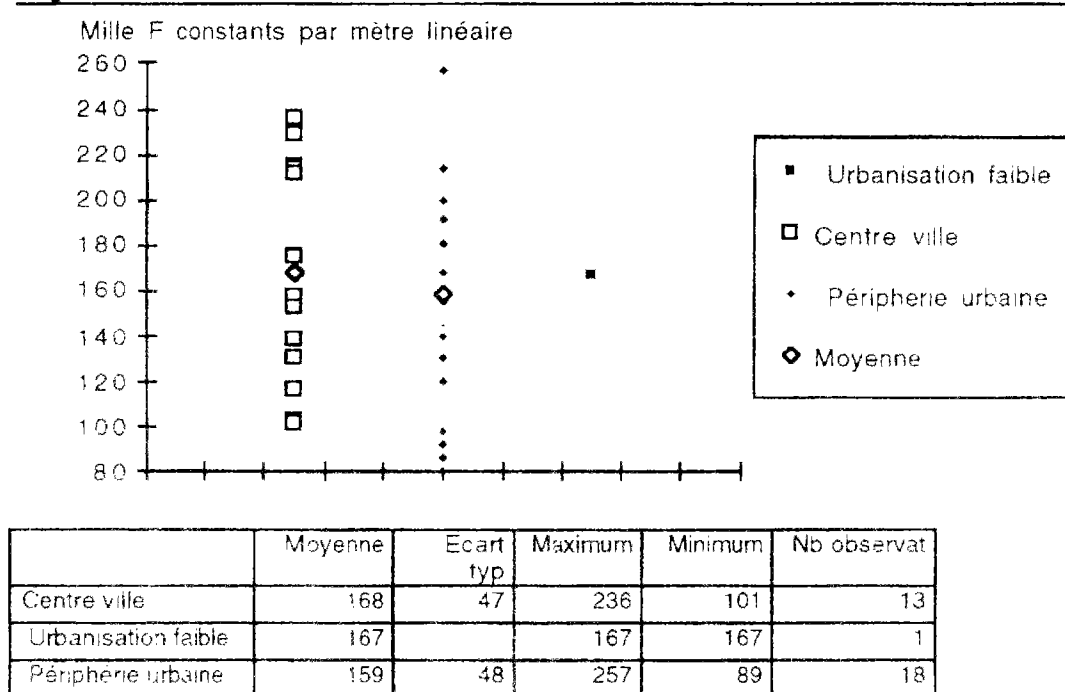
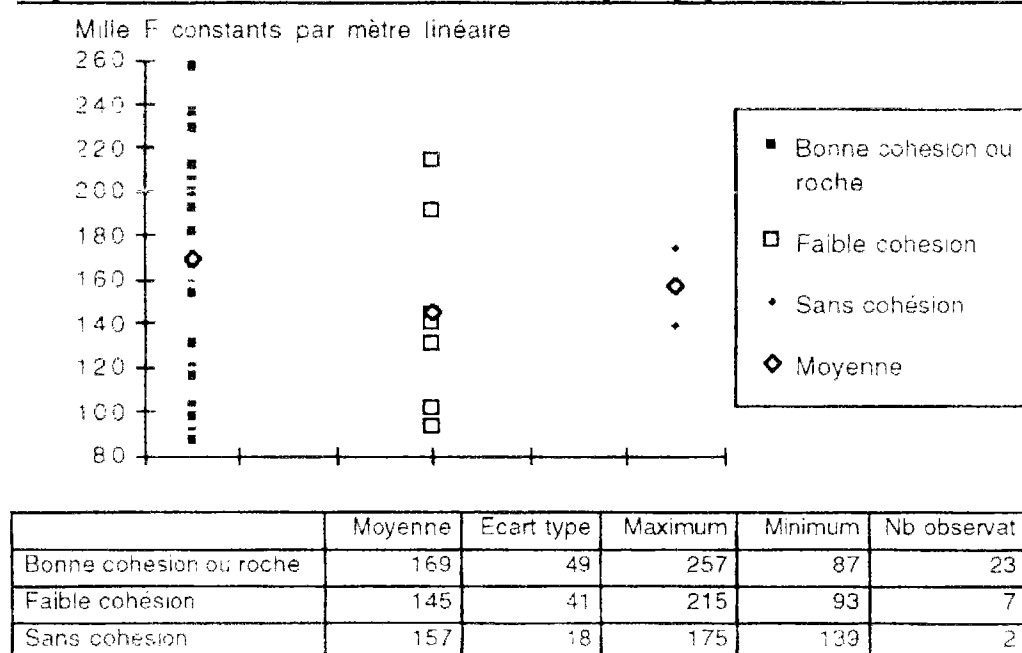


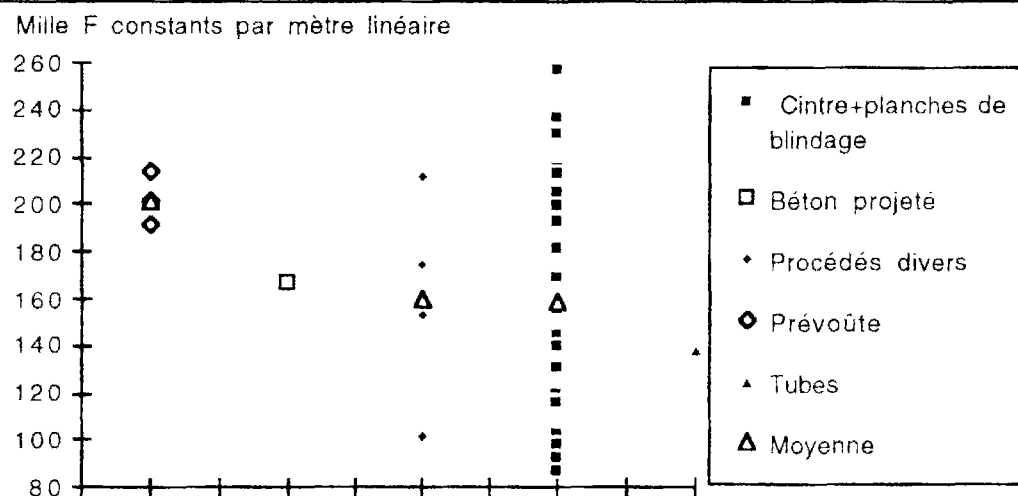
Fig. III E-6: Coût en fonction des conditions géologiques



ANNEXES AU CHAPITRE III

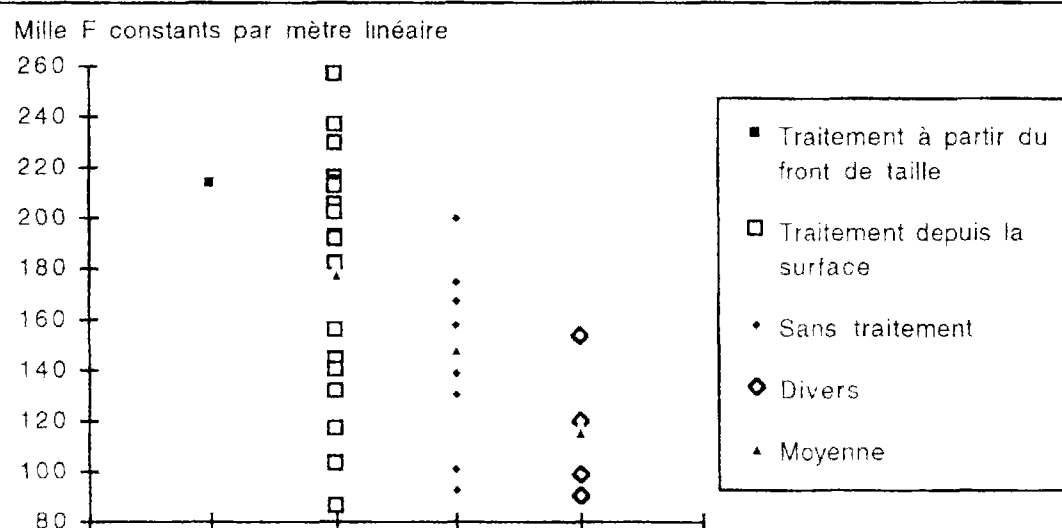
Annexe III E- Coûts des tunnels de métros urbains -Exécution en souterrain - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fig. III E-7. Coût en fonction des méthodes de soutènement



	Moyenne	Ecart type	Maximum	Minimum	Nb observat
Cintre+planches	159	52	257	87	22
Prévoûte	202	9	214	192	3
Procédés divers	160		212	101	5
Béton projeté	167				1
Tubes	139				1

Fig. III E-8. Coût en fonction des méthodes de traitement de terrain



	Moyenne	Ecart type	Maximum	Minimum	Nb observat
Depuis la surface	178	48	257	87	18
Divers	116		153	91	4
Sans traitement	148	33	200	93	9
Du front de taille	213				1

ANNEXES AU CHAPITRE III

Annexe III.F (a) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple (20 variables explicatives, 32 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 20 Independents

Count	32
Num. Missing	0
R	,892
R Squared	,795
Adjusted R Squared	,422
RMS Residual	36,361

ANOVA Table

Mille F vs. 20 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	20	56373,147	2818,657	2,132	,0988
Residual	11	14543,072	1322,097		
Total	31	70916,219			

Regression Coefficients

Mille F vs. 20 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	504,220	483,425	504,220	1,043	,3193
Lg	-,011	,015	-,197	-,762	,4623
An	-2,985	4,633	-,234	-,644	,5326
Ov	1,883	9,696	,052	,194	,8495
St	-3,114	1,670	-,615	-1,865	,0891
Vs	5,640	3,012	,800	1,873	,0879
Pf	,068	4,430	5,809E-3	,015	,9880
Hi	,332	2,225	,049	,149	,8842
Cv	-29,941	82,478	-,312	-,363	,7235
Pu	-59,137	88,037	-,623	-,672	,5156
Pa	9,184	38,785	,093	,237	,8172
Gb	-11,693	44,219	-,112	-,264	,7963
Gf	-32,578	44,389	-,286	-,734	,4784
Mp	24,019	55,948	,242	,429	,6760
Mf	29,829	87,050	,230	,343	,7383
Tm	56,865	78,737	,352	,722	,4852
Ci	-16,448	52,872	-,162	-,311	,7615
Pr	23,974	48,274	,148	,497	,6292
Pt	-8,120	39,822	-,078	-,204	,8422
Ts	13,255	37,980	,140	,349	,7337
Tf	-,537	65,655	-1,986E-3	-8,183E-3	,9936

ANNEXES AU CHAPITRE III

Annexe III.F (b) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple (6 variables explicatives, 32 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 6 Independents

Count	32
Num. Missing	0
R	,835
R Squared	,697
Adjusted R Squared	,625
RMS Residual	29,295

ANOVA Table

Mille F vs. 6 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	6	49461,591	8243,598	9,606	<,0001
Residual	25	21454,628	858,185		
Total	31	70916,219			

Regression Coefficients

Mille F vs. 6 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	774,805	191,448	774,805	4,047	,0004
Lg	-,019	8,462E-3	-,329	-2,250	,0335
An	-5,759	1,928	-,452	-2,988	,0062
St	-3,717	,981	-,734	-3,791	,0008
Vs	5,998	1,386	,850	4,328	,0002
Pu	-50,739	13,666	-,535	-3,713	,0010
Pr	41,114	18,260	,255	2,252	,0334

ANNEXES AU CHAPITRE III

Annexe III.F (c) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple
(6 variables explicatives, 30 observations)

Multiple - Y : Mille/m/L Six X variables

Degré de Lib.:	R-carré:	Erreur Type:	Coef. Var.:
30	.746	27.356	16.826

Tableau de l'Analyse de Variance

Source	Degré de Lib.:	Somme Carrés:	Moyenne Carrés:	F Fisher-Sne.:
RÉGRESSION	6	52627.291	8771.215	11.721
RÉSIDU	24	17960.257	748.344	p ≤ .0001
TOTAL	30	70587.548		

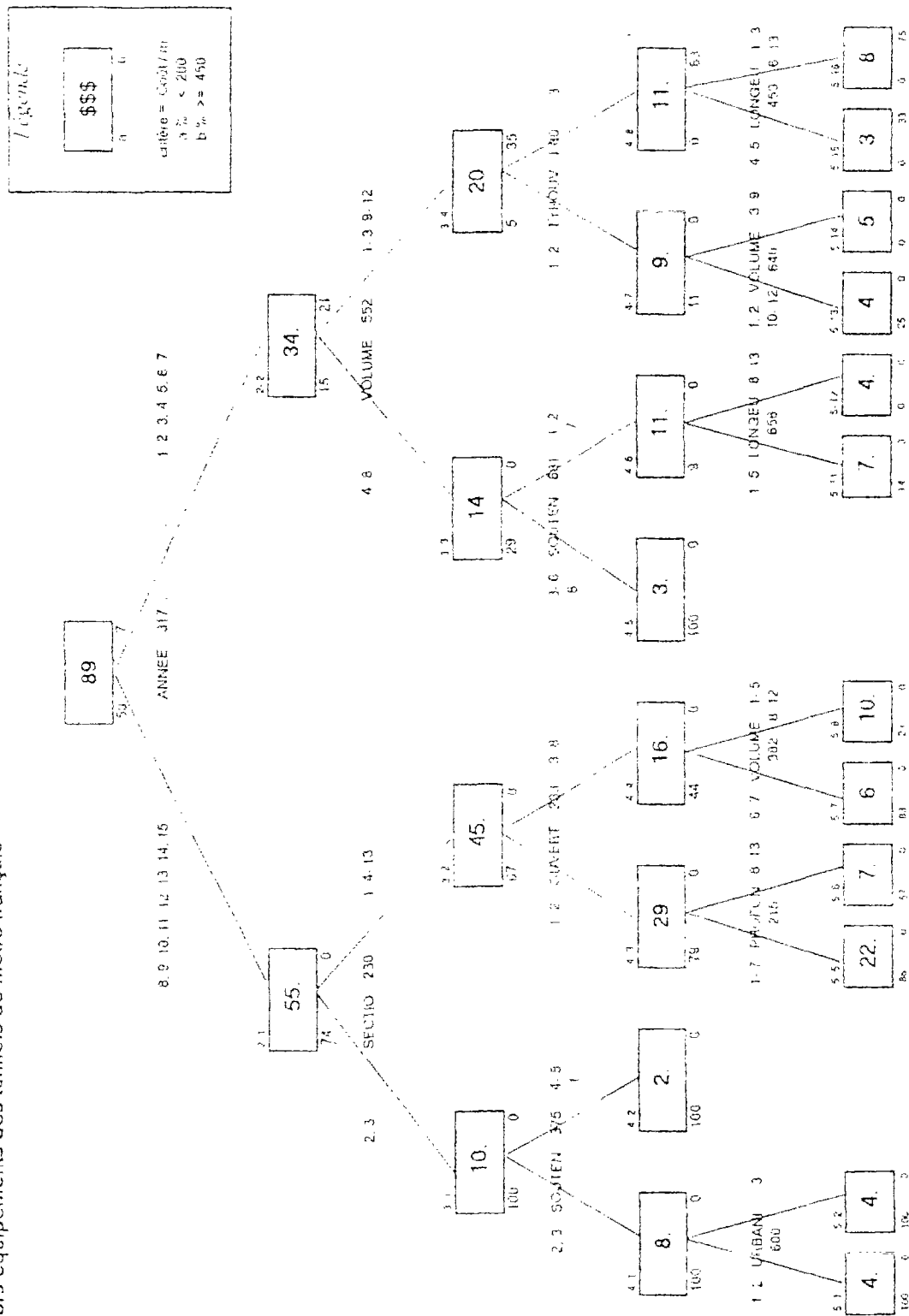
Tableau de Coefficient Béta

Paramètre:	Valeur:	Erreur Type:	Valeur-T:	F Partiel:
INTERVALE	778.959	178.787	4.357	
Longueur(m)	-.022	.008	-2.762	7.628
Années	-5.852	1.801	-3.25	10.56
Section te(m)	-3.574	.918	-3.892	15.151
Volumem3)	5.971	1.294	4.614	21.285
Périphérie	-56.617	13.048	-4.339	18.828
Prévoûte	45.09	17.15	2.629	6.912

ANNEXES AU CHAPITRE III

Annexe III G- Ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux -
Exécution en souterrain et en tranchée couverte - Résultats d'analyse des facteurs
par l'ELISEE

Coût hors équipements des tunnels de métro français



ANNEXES AU CHAPITRE IV

Annexe IV A - Coûts des tunnels de métros urbains

Exécutés en tranchée couverte

Répartition selon les postes de dépense

(En mille F constants par mètre linéaire; Valeurs triées par années)

Année	Locali	Lor/m	Tt	Go	Dr	Af	Ingé	So	Voie	Vcé	Cfo	Cfa	Diver	total
1975	paris	119	9,9	145,3	19,7	2,5	32,0	0,0	12,3	0,0	14,8	14,8	2,5	253,7
1975	paris	548	10,7	146,0	21,9	1,6	31,0	0,0	11,2	1,1	15,0	15,0	1,6	255,1
1975	paris	164	21,4	143,0	25,0	1,8	32,2	0,0	10,7	1,8	14,3	14,3	1,8	266,3
1975	paris	103	17,1	119,5	19,9	2,8	28,5	0,0	11,4	0,0	14,2	14,2	2,8	230,5
1975	province	727	0,0	230,6	5,2	0,0	22,6	0,0	47,6	1,6	36,3	33,9	6,5	384,2
1978	province	560	0,0	185,2	100,9	15,4	81,3	0,0	43,8	0,8	4,2	24,6	6,7	462,9
1978	province	700	0,0	138,5	134,4	15,7	81,4	0,0	43,7	1,3	4,0	24,7	6,7	450,4
1978	province	254	0,0	118,6	134,2	15,6	81,8	0,0	44,1	0,9	3,7	24,8	6,4	430,3
1979	paris	449	0,0	100,2	27,9	32,6	26,9	0,0	9,9	1,9	11,3	9,5	0,9	221,2
1979	paris	194	58,0	186,0	32,8	32,8	48,1	0,0	9,8	2,2	10,9	9,8	1,1	391,6
1979	paris	78	29,9	106,1	16,3	32,6	29,9	0,0	10,9	2,7	10,9	8,2	0,0	247,6
1979	paris	313	30,5	107,1	16,9	32,5	30,5	0,0	10,2	2,0	10,8	9,5	0,7	250,8
1980	province	635	0,0	114,6	69,2	1,8	116,7	0,0	26,5	0,0	9,0	37,6	11,1	386,5
1980	province	235	0,0	125,2	69,1	1,6	117,0	0,0	26,8	0,0	3,9	37,4	11,4	397,4
1982	province	1660	0,0	81,3	119,0	3,1	49,5	0,0	27,3	0,7	3,7	17,0	33,4	335,0
1982	province	350	0,0	140,3	121,4	10,1	46,9	0,0	28,9	4,8	2,2	13,2	36,8	404,6
1982	province	1583	0,0	186,1	35,0	3,2	49,5	0,0	14,9	0,9	1,7	10,8	83,3	385,4
1982	province	380	0,0	161,5	35,1	3,2	49,7	0,0	14,9	0,8	1,6	10,5	34,7	312,1
1982	province	3833	0,0	99,3	49,2	3,2	49,6	0,0	30,0	0,6	1,9	11,9	35,1	280,7
1982	paris	533	1,9	72,0	33,3	0,3	26,4	0,0	11,2	1,4	17,2	16,9	0,0	180,5
1982	Paris	618	0,0	62,6	39,0	5,2	21,2	1,2	9,4	2,1	10,6	15,5	5,4	172,1
1982	paris	414	5,3	82,5	38,3	0,4	24,2	0,4	11,2	1,4	17,2	16,9	0,0	197,6
1982	paris	687	1,9	66,6	31,1	0,4	20,3	0,2	11,2	1,3	17,1	16,9	0,0	167,1
1982	paris	262	8,9	98,7	46,0	0,6	28,3	0,0	11,1	1,1	17,2	16,6	0,0	228,5
1984	paris	279	9,2	163,7	6,4	13,3	39,0	2,8	16,5	0,5	24,3	20,2	1,4	297,2
1984	paris	207	12,4	153,3	49,4	13,0	43,9	3,1	16,7	0,6	24,1	20,4	1,2	338,1
1984	paris	168	9,1	119,6	38,8	12,9	37,3	3,0	16,8	0,8	24,4	20,6	1,5	284,8
1984	paris	161	4,0	74,7	3,2	13,5	23,8	3,2	16,7	0,8	23,8	20,7	1,6	186,0
1984	province	429	0,0	126,6	10,3	0,0	12,0	0,0	24,5	0,5	4,4	0,0	0,0	178,6
1985	province	262	0,0	108,6	21,1	0,0	19,3	2,8	25,2	0,5	6,7	8,7	0,0	194,8
1985	province	108	18,9	206,8	14,5	0,0	32,2	4,4	25,6	0,0	8,9	8,9	0,0	320,3
1985	province	332	15,6	78,1	28,6	0,0	15,2	1,8	25,3	0,0	8,3	8,7	0,0	131,6
1985	province	358	0,0	56,4	37,6	0,0	14,8	5,4	25,5	2,3	8,4	8,7	0,0	159,0
1985	province	867	1,8	67,3	32,4	0,0	13,2	1,9	25,3	0,6	6,4	8,7	0,0	159,7
1985	paris	114	0,0	121,2	37,9	1,1	33,7	0,0	16,9	2,1	21,1	24,2	3,2	261,3
1985	paris	321	0,0	100,3	31,4	0,7	29,6	0,0	17,2	1,9	21,3	23,9	3,4	229,7
1985	paris	81	0,0	109,7	34,1	0,0	31,1	0,0	17,8	1,5	20,8	23,7	3,0	241,7
1985	paris	1366	11,0	83,4	20,8	0,7	27,2	0,0	17,4	2,0	21,2	23,9	3,3	211,0
1985	paris	120	14,0	108,1	31,0	1,0	33,0	0,0	17,0	2,0	21,0	24,0	3,0	254,2
1985	paris	485	4,0	43,6	40,6	0,0	19,1	0,7	14,1	2,0	7,7	5,2	3,5	140,4
1985	paris	2520	10,3	86,3	38,7	3,5	25,2	2,3	19,5	0,6	9,9	3,9	0,0	200,3
1989	province	98	0,0	62,0	15,8	0,0	4,2	0,0	8,4	4,2	3,2	0,0	0,0	97,7
1989	province	72	0,0	52,9	22,9	0,0	4,3	0,0	8,6	4,3	2,9	0,0	0,0	95,8

Note: Tt= Traitement de terrain; Go= Gros oeuvre proprement dit; Dr= Déviation des réseaux;

Af= Acquisition de foncier; So= Second oeuvre; Ingé= Ingénierie;

Vcé= Ventilation, climatisation, épuisements; Cfo= Courants forts; Cfa= Courants faibles

ANNEXES AU CHAPITRE IV

Annexe IV B - Coûts des tunnels de métros urbains

Exécutés en tranchée couverte

Répartition en % selon les postes de dépense

Année	Locali	Lon/m	Tt	Go	Dr	Af	Ingé	So	Voie	Vcé	Cfo	Cfa	diver
1975	paris	119	3,9	57,3	7,8	1,0	12,6	0,0	4,9	0,0	5,8	5,8	1,0
1975	paris	548	4,2	57,2	8,6	0,6	12,2	0,0	4,4	0,4	5,9	5,9	0,6
1975	paris	164	8,1	53,7	9,4	0,7	12,1	0,0	4,0	0,7	5,4	5,4	0,7
1975	paris	103	7,4	51,9	8,6	1,2	12,3	0,0	4,9	0,0	6,2	6,2	1,2
1975	province	727	0,0	60,0	1,4	0,0	5,9	0,0	12,4	0,4	9,4	8,8	1,7
1978	province	560	0,0	40,0	21,8	3,3	17,6	0,0	9,5	0,2	0,9	5,3	1,4
1978	province	700	0,0	30,7	29,9	3,5	18,1	0,0	9,7	0,3	0,9	5,5	1,5
1978	province	254	0,0	27,6	31,2	3,6	19,0	0,0	10,3	0,2	0,9	5,8	1,5
1979	paris	449	0,0	45,3	12,6	14,7	12,2	0,0	4,5	0,9	5,1	4,3	0,4
1979	paris	194	14,8	47,5	8,4	8,4	12,3	0,0	2,5	0,6	2,8	2,5	0,3
1979	paris	78	12,1	42,9	6,6	13,2	12,1	0,0	4,4	1,1	4,4	3,3	0,0
1979	paris	313	12,2	42,7	6,8	13,0	12,2	0,0	4,1	0,8	4,3	3,8	0,3
1980	province	635	0,0	29,6	17,9	0,5	30,2	0,0	6,8	0,0	2,3	9,7	2,9
1980	province	235	0,0	31,5	17,4	0,4	29,4	0,0	6,7	0,0	2,2	9,4	2,9
1982	province	1660	0,0	24,3	35,5	0,9	14,8	0,0	8,1	0,2	1,1	5,1	10,0
1982	province	350	0,0	34,7	30,0	2,5	11,6	0,0	7,2	1,2	0,5	3,3	9,1
1982	province	1583	0,0	48,3	9,1	0,8	12,9	0,0	3,9	0,2	0,5	2,8	21,6
1982	province	380	0,0	51,7	11,3	1,0	15,9	0,0	4,8	0,3	0,5	3,4	11,1
1982	province	3833	0,0	35,4	17,5	1,1	17,7	0,0	10,7	0,2	0,7	4,2	12,5
1982	paris	533	1,1	39,9	18,4	0,2	14,7	0,0	6,2	0,8	9,5	9,4	0,0
1982	Paris	618	0,0	36,3	22,7	3,0	12,3	0,7	5,5	1,2	6,1	9,0	3,1
1982	paris	414	2,7	41,7	19,4	0,2	12,3	0,2	5,7	0,7	8,7	8,5	0,0
1982	paris	687	1,1	39,9	18,6	0,3	12,2	0,1	6,7	0,8	10,3	10,1	0,0
1982	paris	262	3,9	43,2	20,1	0,2	12,4	0,0	4,9	0,5	7,5	7,3	0,0
1984	paris	279	3,1	55,1	2,2	4,5	13,1	0,9	5,6	0,2	8,2	6,8	0,5
1984	paris	207	3,7	45,3	14,6	3,8	13,0	0,9	4,9	0,2	7,1	6,0	0,4
1984	paris	168	3,2	42,0	13,6	4,5	13,1	1,1	5,9	0,3	8,6	7,2	0,5
1984	paris	161	2,1	40,2	1,7	7,3	12,8	1,7	9,0	0,4	12,8	11,1	0,9
1984	province	429	0,0	71,0	5,8	0,0	6,7	0,0	13,7	0,3	2,4	0,0	0,0
1985	province	262	0,0	55,8	10,8	0,0	9,9	1,4	12,9	0,2	4,5	4,5	0,0
1985	province	108	5,9	64,6	4,5	0,0	10,1	1,4	8,0	0,0	2,8	2,8	0,0
1985	province	332	8,6	43,0	15,7	0,0	8,4	1,0	13,9	0,0	4,6	4,8	0,0
1985	province	358	0,0	35,4	23,6	0,0	9,3	3,4	16,0	1,5	5,3	5,5	0,0
1985	province	867	1,1	42,2	20,3	0,0	8,2	1,2	15,9	0,3	5,3	5,5	0,0
1985	paris	114	0,0	46,4	14,5	0,4	12,9	0,0	6,5	0,8	8,1	9,3	1,2
1985	paris	321	0,0	43,6	13,7	0,3	12,9	0,0	7,5	0,8	9,3	10,4	1,5
1985	paris	81	0,0	45,4	14,1	0,0	12,9	0,0	7,4	0,6	8,6	9,8	1,2
1985	paris	1366	5,2	39,5	9,9	0,3	12,9	0,0	8,3	1,0	10,0	11,3	1,6
1985	paris	120	5,5	42,5	12,2	0,4	13,0	0,0	6,7	0,8	8,3	9,4	1,2
1985	paris	485	2,8	31,0	28,9	0,0	13,6	0,5	10,1	1,4	5,5	3,7	2,5
1985	paris	2520	5,2	43,1	19,3	1,8	12,6	1,2	9,8	0,3	4,9	1,9	0,0
1989	province	98	0,0	63,4	16,1	0,0	4,3	0,0	8,6	4,3	3,2	0,0	0,0
1989	province	72	0,0	55,2	23,9	0,0	4,5	0,0	9,0	4,5	3,0	0,0	0,0

Note: Tt= Traitement de terrain; Go= Gros oeuvre proprement dit; Dr= Déviation des réseaux;

Af= Acquisition de foncier; So= Second oeuvre; Ingé= Ingénierie;

Vcé= Ventilation, climatisation, épuisements; Cfo= Courants forts; Cfa= Courants faibles.

ANNEXES AU CHAPITRE IV

Annexe IV C - Coûts des tunnels de métros urbains

Exécutés en tranchée couverte

Coûts et % des postes de dépense important

(En mille F constants par mètre linéaire)

Année	Localité	Lon/m	Hors équipe	Hors équipe %	Equipements	Equipements %	Totaux
1975	paris	119	203,0	80,0	47,9	18,9	253,7
1975	paris	548	205,2	80,4	48,1	18,9	255,1
1975	paris	164	217,5	81,7	46,8	17,6	266,3
1975	paris	103	181,8	78,9	45,5	19,7	230,5
1975	province	727	250,6	65,2	126,8	33,0	384,2
1978	province	560	365,8	79,0	89,0	19,2	462,9
1978	province	700	352,2	78,2	90,0	20,0	450,4
1978	province	254	331,5	77,0	90,8	21,1	430,3
1979	paris	449	183,0	82,7	37,1	16,8	221,2
1979	paris	194	352,9	90,1	37,4	9,6	392,0
1979	paris	78	210,4	85,0	37,1	15,0	247,6
1979	paris	313	213,0	84,9	37,0	14,8	250,8
1980	province	635	265,8	68,8	104,7	27,1	386,5
1980	province	235	277,6	69,9	103,7	26,1	397,4
1982	province	1660	238,7	71,3	57,2	17,1	335,0
1982	province	350	307,4	76,0	55,5	13,7	404,6
1982	province	1583	257,3	66,8	32,5	8,4	385,4
1982	province	380	337,7	76,2	33,1	10,6	312,1
1982	province	3833	184,3	65,6	53,9	19,2	280,7
1982	paris	533	125,9	69,7	54,6	30,3	180,5
1982	Paris	618	121,7	70,7	42,9	24,9	172,0
1982	paris	414	144,0	72,9	53,2	26,9	197,6
1982	paris	687	113,9	68,2	53,0	31,7	167,1
1982	paris	262	176,0	77,0	52,5	23,0	228,5
1984	paris	279	221,7	74,6	70,7	23,8	297,2
1984	paris	207	262,1	77,5	71,0	21,0	338,1
1984	paris	168	207,7	72,9	71,9	25,2	284,8
1984	paris	161	109,4	58,8	71,1	38,2	186,0
1984	province	429	147,0	82,4	31,5	17,6	178,6
1985	province	262	144,0	73,9	47,8	24,5	194,8
1985	province	108	267,1	83,4	48,2	15,1	320,3
1985	province	332	133,4	73,5	46,2	25,4	181,6
1985	province	358	103,5	65,1	49,6	31,2	159,0
1985	province	867	110,7	69,3	46,9	29,4	159,7
1985	paris	114	183,9	70,4	73,8	28,2	261,3
1985	paris	321	152,0	66,2	73,9	32,1	229,7
1985	paris	81	165,1	68,3	73,2	30,3	241,7
1985	paris	1366	133,1	63,1	74,1	35,1	211,0
1985	paris	120	177,1	69,7	73,6	29,0	254,2
1985	paris	485	102,0	72,7	33,5	23,9	140,4
1985	paris	2520	158,9	79,3	38,7	19,3	200,3
1989	province	98	81,2	83,1	16,5	16,9	97,7
1989	province	72	79,3	82,8	16,5	17,2	95,8

Note:

-Coûts hors équipements comportent les postes de dépenses:

Traitement de terrain; Gros oeuvre proprement dit; Déviation des réseaux;

Acquisition de foncier; Second oeuvre;

-Coûts des équipements comportent les postes de dépenses:

Ventilation, climatisation, épaissements; Courants forts; Courants faibles.

-Le coût d'ingénierie est reparti sur chaque poste.

ANNEXES AU CHAPITRE IV

Annexe IV D - Tunnels de métros urbains

Exécutés en tranchée couverte

Coûts hors équipements et caractéristiques des travaux

(Triés par coûts décroissants en mille F constants par mètre linéaire)

Coûts	m	Lc	An	Pf	Ov	St	Vs	Hi	Ub	Cg	Tp	Me	So	Mt
365,8	560	pv	78	-8	7,8	81	13	7	Cv	Gs	Pp	Ir	Bt	Co
352,9	194	pa	79	-9	8,6	148	30	1	Pu	Gb	Bl	Po	Bt	Sd
352,2	700	pv	78	-6	7,7	63	12	5	Cv	Gs	Pp	Ir	Bt	Co
331,5	254	pv	78	-6	7,7	45	12	6	Cv	Gs	Pm	Ir	Bt	Sd
307,4	350	pv	82	-7	8,1	72	14	4	Cv	Gf	Pp	Po	Bt	Co
277,6	235	pv	80	-9	8,5	95	13	0	Uf	Gs	Bl	0	Bt	Co
267,1	108	pv	85	-9	6,2	56	9	6	Cv	Gb	Pm	Ir	Bt	Sd
265,8	635	pv	80	-8	8	81	15	0	Cv	Gs	Bl	0	Bt	Co
262,1	207	pa	84	-6	10,8	154	31	0	Pu	Gb	Bl	0	Bt	Co
257,3	1583	pv	82	-10	7,6	106	14	8	Cv	Gs	Pp	Ir	Bt	Co
250,6	727	pv	75	-6	7,8	100	16,5	2	Pu	Gf	Ft	0	0	Co
238,7	1660	pv	82	-6	7,6	60	14	0	Cv	Gs	Dv	0	pd	Co
237,7	380	pv	82	-7	7,6	70	14	5	Cv	Gs	Pm	Ir	Bt	Co
221,7	279	pa	84	-9	6,9	97	14	0	Pu	Gb	Bl	0	Bt	Co
217,5	164	pa	75	-9	6,9	99	22	4	Pu	Gb	Pp	Ri	Bt	Sd
213,0	313	pa	79	-6	7	67	24	2	Pu	Gs	Pm	Ir	Ss	Sd
210,4	78	pa	79	-5	10	98	20	2	Pu	Gs	Pm	Ir	Ss	Sd
207,7	168	pa	84	-6	7,5	110	23	0	Pu	Gb	Bl	0	Bt	Co
205,2	548	pa	75	-7	6,9	125	36	3	Cv	Gf	Pp	0	pd	Sd
203,0	119	pa	75	-12	6,9	168	35	3	Pu	Gb	Pc	Po	Bt	Co
184,3	3833	pv	82	-7	7,6	64	14	0	Pu	Gs	Bl	Po	pd	Co
183,9	114	pa	85	-11	9	130	22	0	Pu	Gf	Bl	0	Bt	Co
183,0	449	pa	79	-9	6,9	91	16	0	Cv	Gb	Bl	0	Bt	Co
181,8	103	pa	75	-8	6,9	150	24	4	Pu	Gf	Pm	Ri	pd	Sd
177,1	120	pa	85	-7	7,2	80	20	0	Cv	Gf	Bl	0	Bt	Co
176,0	262	pa	82	-8	7	113	21	2	Pu	Gb	Pp	Po	Bt	Co
165,1	81	pa	85	-10	7,5	104	18	0	Cv	Gf	Bl	0	Bt	Co
158,9	2520	pa	85	-9	6,2	63	9	2	Pu	Gb	Bl	Ri	Bt	Co
152,0	321	pa	85	-10	7,1	100	16	0	Cv	Gf	Bl	0	Bt	Co
147,0	429	pv	84	-9	7,8	89	13	6	Pu	Gf	Pm	Po	Bt	Co
144,0	262	pv	85	-8	6,2	56	9	0	Uf	Gb	Bl	0	Bt	Co
144,0	414	pa	82	-11	7,3	137	17	0	Pu	Gf	Bl	0	Bt	Co
133,4	332	pv	85	-9	6,2	54	9	7	Cv	Gb	Bl	Ir	Bt	Co
133,1	1366	pa	85	-7	7,1	98	18	0	Cv	Gf	Bl	0	Bt	Co
125,9	533	pa	82	-10	7,1	112	17	0	Pu	Gf	Bl	0	Bt	Co
121,7	618	pa	82	-12	7,1	114	18	0	Pu	Gb	Bl	0	Bt	Co
113,9	687	pa	82	-11	7,1	94	18	0	Pu	Gb	Bl	0	Bt	Co
110,7	867	pv	85	-6	6,2	42	9	0	Pu	Gb	Bl	0	Bt	Co
109,4	161	pa	84	-8	7	160	29	7	Pu	Gf	Pm	Ir	Bt	Co
103,5	358	pv	85	-6	6,5	42	9	7	Pu	Gb	Bl	Ir	Bt	Co
102,0	485	pa	85	-7	6,9	68	16	0	Cv	Gf	Bl	0	Bt	Co
81,2	98	pv	89	-10	6,9	87	14	4	Pu	Gs	Pm	Ir	tir	Co
79,3	72	pv	89	-9	6,9	79	14	5	Cv	Gs	Pm	Ir	Bt	Co

Note:

Lc=Localité: pa:Paris;pv:province.

St= Section terrassée(M2).

Pf= Profondeur du rail par rapport au sol naturel(M);

Vs= Volume de structure (m3:metre linéaire);

Ov= Ouverture intérieure du tunnel (m);

Ub= Urbanisation: (Cv)= centre ville; (Pu)= périphérie urbaine, (Uf)= urbanisation faible;

Hi= Hauteur moyenne de la nappe au dessus du fond de fouille(m).

Cg= Conditions géologique: (Gb)=bonne cohésion ou roche; (Gf)=faible cohésion; (Gs)=sans cohésion.

Tp= Type de blindage péripérique (Bl)= beninoise; (Pm)=paroi moulée; (Pp)=paroi préfabriquée.

(Pc)=palplanches; (Ft)=fouille talutée, (Dv)=divers

Me= Mesures vis à vis de la présence de nappe phréatique (Po)=pompage; (Ir)=injection en radier.

(Ri)=niveau d'injections périphériques; (0)=sans mesure.

Mt= Terrassement (Co)= à ciel ouvert; (Sd)= sous dalle ou sous platelage;

So= Soutènement (Bt)=butons, (pd)=procédés divers; (tir)=tirants;(Ss)=Sans soutènement;

ANNEXES AU CHAPITRE IV

Annexe IV E- Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en tranchée couverte - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fig. IV E-1. Coût en fonction du volume de structure (m³)

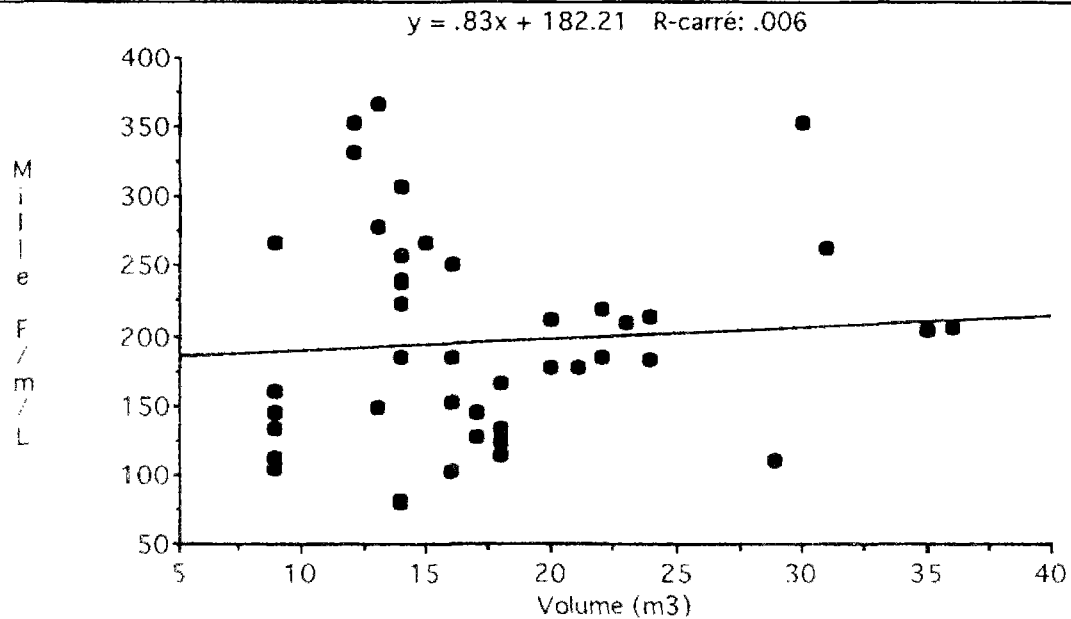
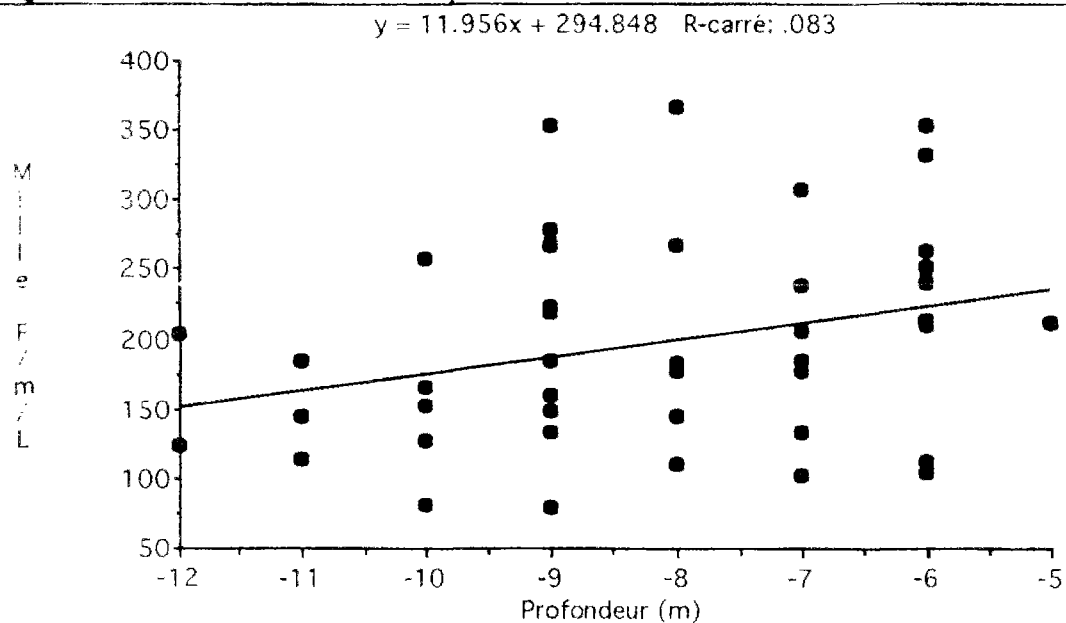


Fig. IV E-2 Coût en fonction de la profondeur de tunnel (m)



ANNEXES AU CHAPITRE IV

Annexe IV E- Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en tranchée couverte - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fig. IV E-3 Coût en fonction de la section terrassée (m2)

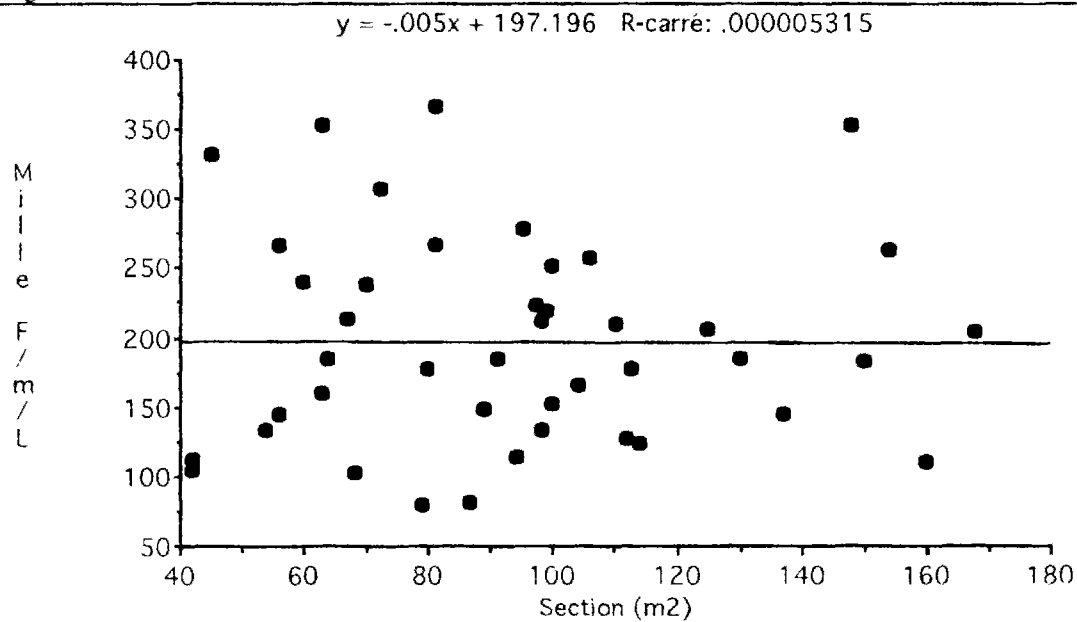
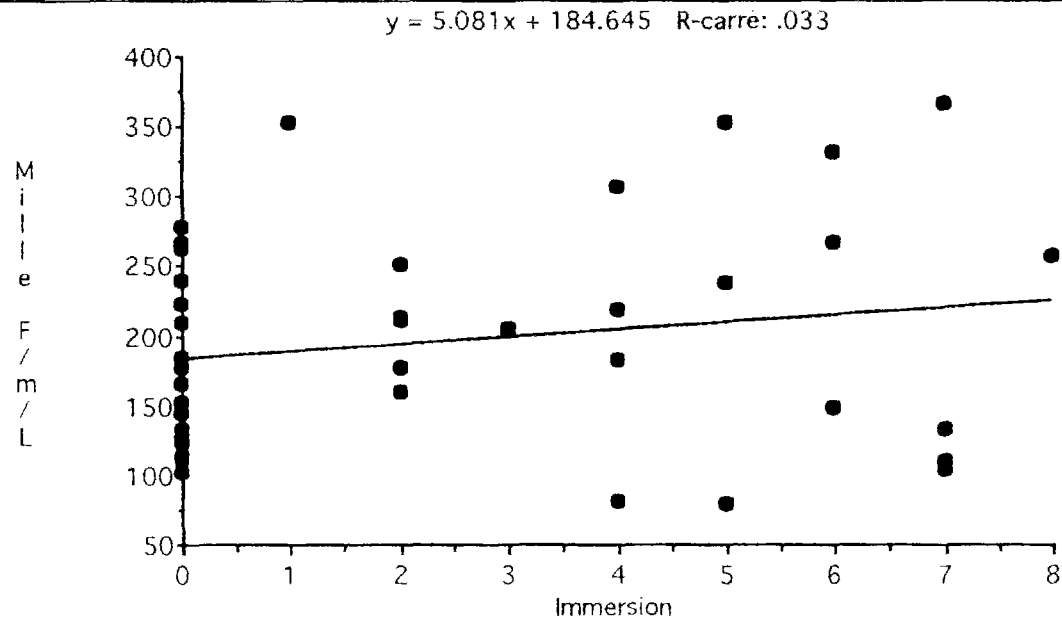


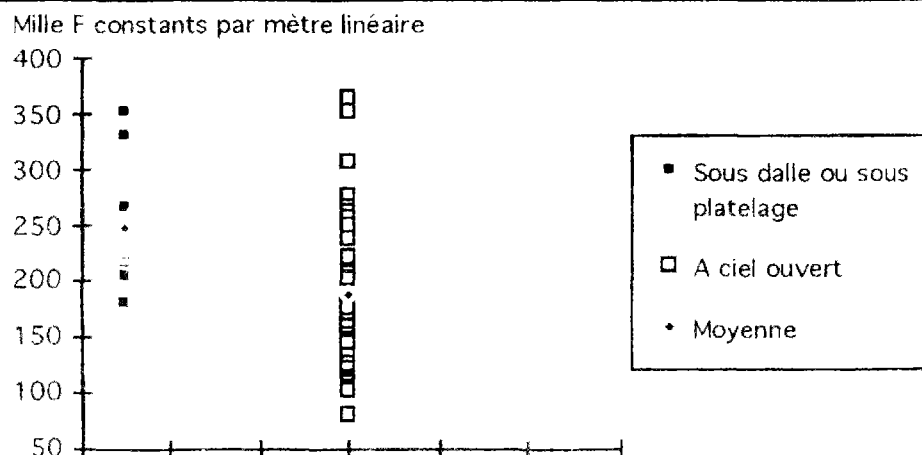
Fig. IV E-4 Coût en fonction de la profondeur sous la nappe



ANNEXES AU CHAPITRE IV

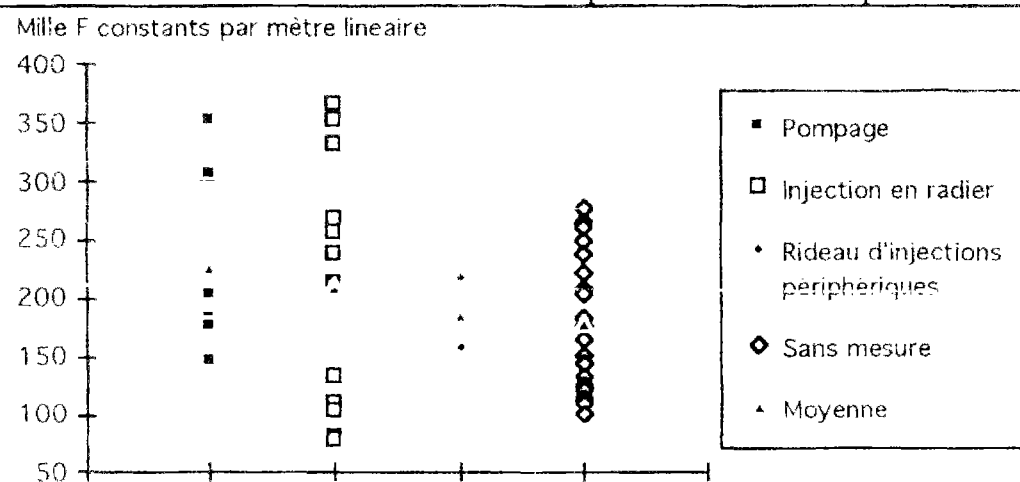
Annexe IV E- Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en tranchée couverte - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fg: IV E-5 Coût classé en fonction de méthodes de terrassements



	Moyenne	Écart type	Maximum	Minimum	Nb observa
Sous dalle	247	59	353	182	8
Ciel ouvert	188	72	366	79	35

Fg: IV E-6: Coût classé en fonction de mesures prises vis-à-vis de la présence de l'eau

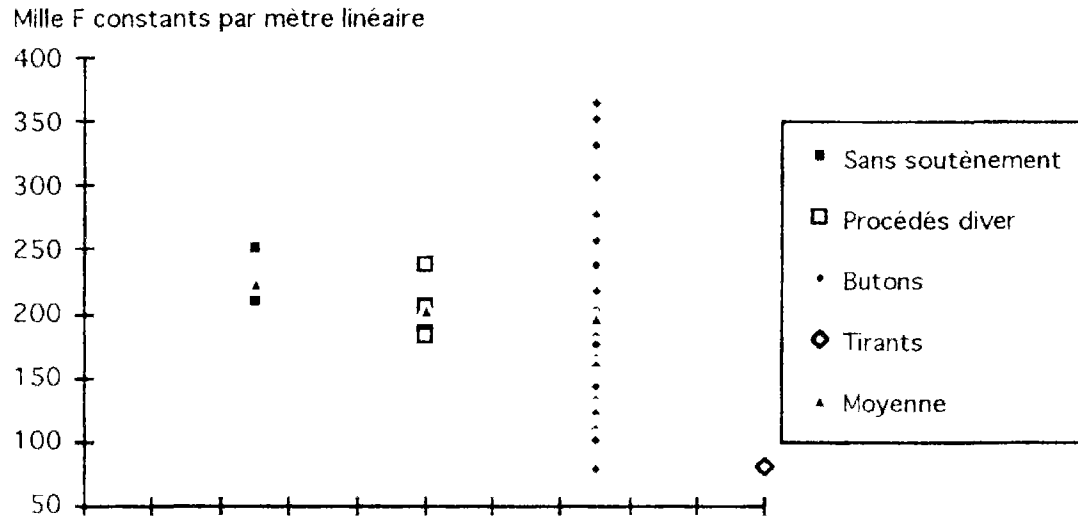


	Moyenne	Écart type	Maximum	Minimum	Nb observa
Pompage	228	75	353	147	6
Rideau d'injection	186	24	218	159	3
Sans mesure	180	55	278	102	21
Injection en radier	211	99	366	79	13

ANNEXES AU CHAPITRE IV

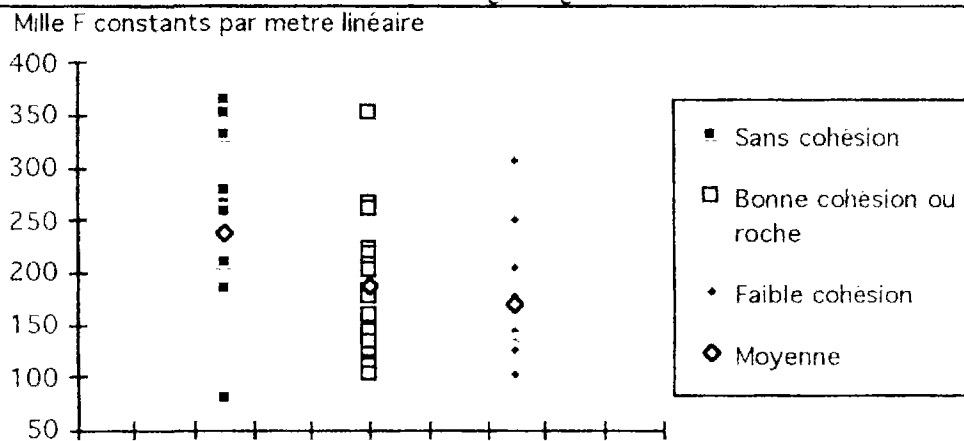
Annexe IV E- Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en tranchée couverte - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fg: IV E-7 Coût classé en fonction de méthode de soutènement



	Moyenne	Écart type	Maximum	Minimum	Nb observa
Sans soutènement	225	17	251	210	3
Procédés divers	203		239	182	4
Butons	179	96	366	79	25
Tirants	81				1

Fg: IV E-8 Coût classé en fonction de la géologie du terrain

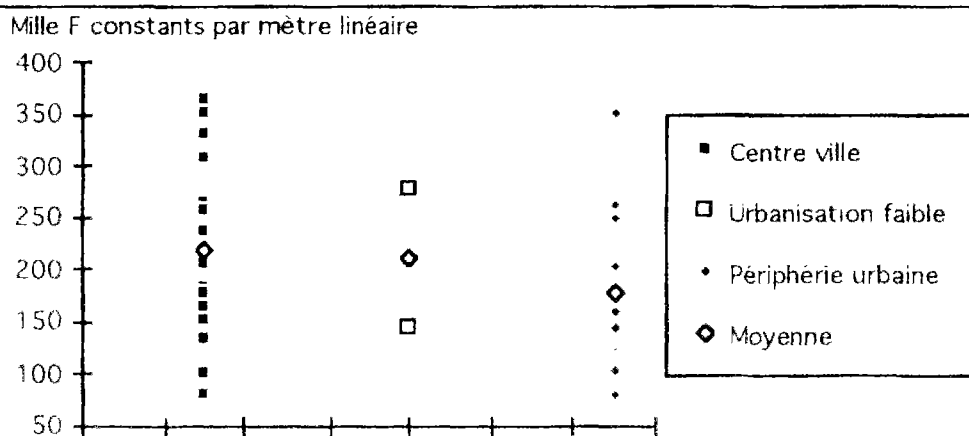


	Moyenne	Écart type	Maximum	Minimum	Nb observat
Sans cohésion	238	86	366	79	13
Bonne cohésion ou roche	186	66	353	104	16
Faible cohésion	170	53	307	102	14

ANNEXES AU CHAPITRE IV

Annexe IV E- Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en tranchée couverte - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fg: IV E-9 Coût classé en fonction de la urbanisation



	Moyenne	Écart type	Maximum	Minimum	Nb observat
Centre ville	220	83	366	79	18
Urbanisation faible	211		278	144	2
Périphérie urbaine	177	61	353	81	23

ANNEXES AU CHAPITRE IV

Annexe IV.F(a) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en tranchée couverte - Résultats d'analyse de la régression multiple (22 variables explicatives, 43 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 22 Independents

Count	43
Num. Missing	0
R	,897
R Squared	,805
Adjusted R Squared	,590
RMS Residual	48,325

ANOVA Table

Mille F vs. 22 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	22	192809,577	8764,072	3,753	,0021
Residual	20	46705,493	2335,275		
Total	42	239515,070			

Regression Coefficients

Mille F vs. 22 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	809,134	333,512	809,134	2,426	,0248
Lg	4,684E-3	,018	,044	,267	,7924
An	-8,564	4,363	-,415	-1,963	,0637
Ov	26,288	13,323	,359	1,973	,0625
St	,743	,767	,322	,969	,3442
Vs	-2,802	3,648	-,254	-,768	,4513
Pf	-5,361	7,494	-,129	-,715	,4826
Hi	-14,521	12,796	-,517	-1,135	,2699
Cv	23,626	47,109	,156	,502	,6215
Pu	-10,981	46,990	-,073	-,234	,8176
Pa	-45,210	45,848	-,301	-,986	,3359
Gb	8,936	50,309	,058	,178	,8608
Gf	,764	53,949	4,795E-3	,014	,9888
Co	-73,931	40,961	-,385	-1,805	,0862
Ss	-22,588	56,228	-,077	-,402	,6921
Bt	72,420	37,987	,378	1,906	,0711
Bl	-72,634	57,503	-,485	-1,263	,2211
Pm	-89,297	66,781	-,505	-1,337	,1962
Pp	-35,246	62,032	-,174	-,568	,5762
Pc	-68,730	101,449	-,139	-,677	,5059
Ir	85,907	80,056	,529	1,073	,2960
Po	50,165	39,006	,233	1,286	,2131
Ri	29,424	57,875	,100	,508	,6167

ANNEXES AU CHAPITRE IV

Annexe IV.F-(b) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en tranchée couverte - Résultats d'analyse de la régression multiple (8 variables explicatives, 43 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 8 Independents

Count	43
Num. Missing	0
R	,858
R Squared	,736
Adjusted R Squared	,673
RMS Residual	43,150

ANOVA Table

Mille F vs. 8 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	8	176208,847	22026,106	11,830	<,0001
Residual	34	63306,223	1861,948		
Total	42	239515,070			

Regression Coefficients

Mille F vs. 8 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	603,366	231,445	603,366	2,607	,0135
An	-7,388	2,886	-,358	-2,560	,0151
Ov	40,085	6,910	,548	5,801	<,0001
Vs	-3,517	1,166	-,319	-3,017	,0048
Cv	26,013	14,734	,172	1,766	,0865
Co	-65,032	25,090	-,339	-2,592	,0140
Bt	49,078	19,748	,256	2,485	,0180
Bl	-46,697	21,352	-,312	-2,187	,0357
Pm	-55,879	26,247	-,316	-2,129	,0406

ANNEXES AU CHAPITRE IV

Annexe IV.F (c) - Coûts des tunnels de métros urbains - Exécution en tranchée couverte - Résultats d'analyse de la régression multiple (4 variables explicatives, 39 observations)

Multiple - Y : Mille/m/L Quatre X variables

Degré de Lib.:	R-carré:	Erreur Type:	Coef. Var.:
38	.794	35.483	18.685

Tableau de l'Analyse de Variance

Source	Degré de Lib.:	Somme Carrés:	Moyenne Carrés:	F Fisher-Sne.:
RÉGRESSION	4	164713.464	41178.366	32.706
RÉSIDU	34	42808.126	1259.063	$p \leq .0001$
TOTAL	38	207521.59		

Tableau de Coefficient Béta

Paramètre:	Valeur:	Erreur Type:	Valeur-T:	F Partiel:
INTERVALE	995.382	151.308	6.579	
Années	-12.85	1.672	-7.687	59.093
Ouverture(m)	43.229	6.327	6.832	46.679
Volume(m3)	-3.06	.994	-3.077	9.47
Périphérie	-40.331	11.981	-3.366	11.332

ANNEXES AU CHAPITRE V

Annexe V A- Coûts des tunnels de métro régional Exécutés en souterrain

Répartition des coûts et leur % selon les postes de dépense

(En millions de francs par mètre linéaire)

Année	Mètres	Tl	% Tl	Go	% Go	Dr	% Dr	At	% At	Ingé	% Ingé	Voie	% Voie	Vcé	% Vcé	Cfo	% Cfo	Cfa	% Cfa	Diver	% Diver	Total
1977	400	74,6	13,0	341,0	59,5	7,0	1,2	5,7	1,0	63,2	11,0	14,7	2,6	9,6	1,7	31,3	5,4	19,8	3,4	7,0	1,2	574,8
1977	338	61,9	12,6	283,9	57,6	5,3	1,1	5,3	1,1	54,4	11,0	14,3	2,9	9,8	2,0	31,0	6,3	19,6	4,0	7,5	1,5	493,0
1977	3603	3,9	1,0	296,9	63,1	5,6	1,5	5,6	1,5	41,3	11,0	14,5	3,9	9,6	2,6	31,1	8,3	19,7	5,2	7,4	2,0	375,5
1977	653	57,8	10,7	321,6	59,4	3,1	0,6	6,3	1,2	59,4	11,0	16,4	3,0	10,9	2,0	35,2	6,5	22,3	4,1	8,2	1,5	541,2
1977	567	140,4	21,2	457,3	53,9	4,1	0,6	5,4	0,8	72,9	11,0	14,9	2,2	9,5	1,4	31,5	4,8	19,8	3,0	7,2	1,1	662,9
1977	230	119,8	14,3	528,1	63,1	7,8	0,9	5,5	0,7	92,1	11,0	14,4	1,7	10,0	1,2	31,1	3,7	20,0	2,4	7,8	0,9	836,5
1977	177	43,0	10,6	223,4	48,1	75,0	16,1	10,1	2,2	50,5	10,9	13,0	2,8	2,9	0,5	25,9	5,6	14,4	3,1	0,0	0,0	464,2
1977	118	285,4	34,9	374,1	45,8	21,6	2,6	6,5	0,8	89,7	10,8	8,6	1,1	2,2	0,3	19,5	2,4	10,8	1,3	0,0	0,0	817,4
1977	550	222,7	33,3	290,4	43,5	17,2	2,6	9,7	1,5	72,4	10,8	12,5	1,9	2,3	0,3	26,0	3,9	14,8	2,2	0,0	0,0	668,1
1977	315	99,6	20,0	267,3	53,6	13,0	2,6	9,7	1,9	54,3	10,9	12,2	2,4	2,4	0,5	25,9	5,2	14,6	2,9	0,0	0,0	499,0
1981	942	129,6	18,8	359,6	52,6	7,4	1,1	16,9	2,5	83,0	12,2	9,0	1,3	4,1	0,5	43,0	6,3	28,1	4,1	3,5	0,5	683,2
1981	264	128,4	18,8	360,0	52,7	7,1	1,0	16,9	2,5	84,3	12,3	9,1	1,3	3,9	0,5	42,8	6,3	27,9	4,1	3,2	0,5	683,6
1988	625	89,3	23,0	216,5	55,7	0,0	0,0	0,0	0,0	54,8	14,1	5,9	1,5	3,5	0,9	6,0	1,6	12,9	3,3	0,0	0,0	388,9
1988	308	74,1	26,0	128,5	45,1	10,2	3,6	0,0	0,0	39,8	14,0	7,5	2,6	3,7	1,3	6,8	2,4	14,3	5,0	0,0	0,0	284,8

Note: Tl= Traitement de terrain; Go= Gros oeuvre proprement dit; Dr= Déviation des réseaux; At= Acquisition de foncier;

Inge= ingénierie; Vcé= Ventilation, climatisation, épaissements; Cfo= Courants forts; Cfa= Courants faibles;

ANNEXES AU CHAPITRE V

Annexe V B - Coûts des tunnels de métro régional

Exécutés en souterrain

Coûts et % des postes de dépense important

(En mille F constants par mètre linéaire)

Année	Mètre	Hors équi	% hors équi	Equipem	% Equipe	Total
1977	400	482,3	83,9	84,6	14,7	574,8
1977	338	400,5	81,2	84,0	17,0	493,0
1977	2603	283,1	75,4	84,1	22,4	375,5
1977	653	436,7	80,7	95,2	17,6	541,2
1977	567	569,8	86,0	84,9	12,8	662,9
1977	230	743,0	88,8	84,8	10,1	836,5
1977	177	401,1	86,4	63,1	13,6	464,2
1977	118	771,3	94,4	46,1	5,6	817,4
1977	550	605,6	90,7	62,4	9,3	668,1
1977	315	437,2	87,6	61,8	12,4	499,0
1981	992	583,4	85,4	95,9	14,0	683,2
1981	264	584,5	85,5	95,4	14,0	683,6
1988	625	355,9	91,5	32,9	8,5	388,9
1988	308	247,3	86,8	37,5	13,2	284,8

Note:

-Coûts hors équipements comportent les postes de dépenses:

Traitement de terrain; Gros oeuvre proprement dit; Déviation des réseaux;

Acquisition de foncier; Second oeuvre;

-Coûts des équipements comportent les postes de dépenses:

Ventilation, climatisation, épuisements; Courants forts; Courants faibles.

-Le coût d'Ingénierie est réparti sur chaque poste.

ANNEXES AU CHAPITRE V

Annexe V C - Tunnels de métro régional Exécutés en souterrain

Coûts hors équipements et caractéristiques des travaux

(Triés par coûts décroissants en Mille F constants par mètre linéaire)

Coûts	m	An	Pf	Ov	St	Vs	Hi	Cg	Ms	Mr	Tt
771	118	77	-17	10	130	54	12	Gb	Ci	Tm	Tf
743	230	77	-17	11,4	98	38	7	Gf	Tb	Tm	Ts
606	550	77	-23	11,4	90	32	14	Gb	Ci	Mp	Tf
583	992	81	-9	9,1	93	31	11	Gf	pr	Mp	Tg
585	264	81	-9	9,1	93	31	11	Gf	Ci	Mp	Tg
570	567	77	-22	11,4	96	32	10	Gb	Ci	Mp	Tf
482	400	77	-20	8,7	89	38	10	Gb	Ci	Mp	Tg
437	315	77	-28	11,4	94	32	17	Gb	Bp	Ex	Tf
401	177	77	-16	8,7	90	30	2	Gf	Ci	Tm	Ts
401	338	77	-22	11,4	96	42	10	Gb	Ci	Mp	Tg
437	653	77	-27	11,4	96	32	10	Gb	Ci	Mp	Tg
356	625	88	-20	9	85	26	8	Gf	Ci	Mp	Ts
283	2063	77	-25	12,6	82	16	10	Gb	Ts	Mf	Ts
247	308	88	-15	9	85	26	6	Gf	Ci	Mp	Ts

Pf: Niveau du rail par rapport au sol naturel (m);

Ov: Ouverture intérieure (m)

St: Section terrassée (m²);

Vs: Volume de structure (m³/mètre linéaire);

Cg: Condition géologiques: Gb=bonne cohésion ou roche; Gf=faible cohésion;

Ms: Méthodes de soutènement: Ci= Cintres+planches de blindage, Tb=tubes;

Bp= Béton projeté; Pr= Prévoute.

Mr: Méthodes de terrassement: Mp= Machine attaque ponctuelle; Mf= Machine à forer plein section;

Tm= Terrassement manuelle; Ex=explosif;

Hi: Hauteur moyenne de la nappe au dessus du fond de foule;

Tt: Traitement de terrain;

Tg= Traitement à l'avancement à partir d'une galerie pilote;

Ts= Traitement depuis surface;

Tf= Traitement à partir du front de taille;

ANNEXES AU CHAPITRE V

Annexe V D- Coûts des tunnels de métro régional -Exécution en souterrain - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fig V.D-1- Coûts en fonction de longueur en m

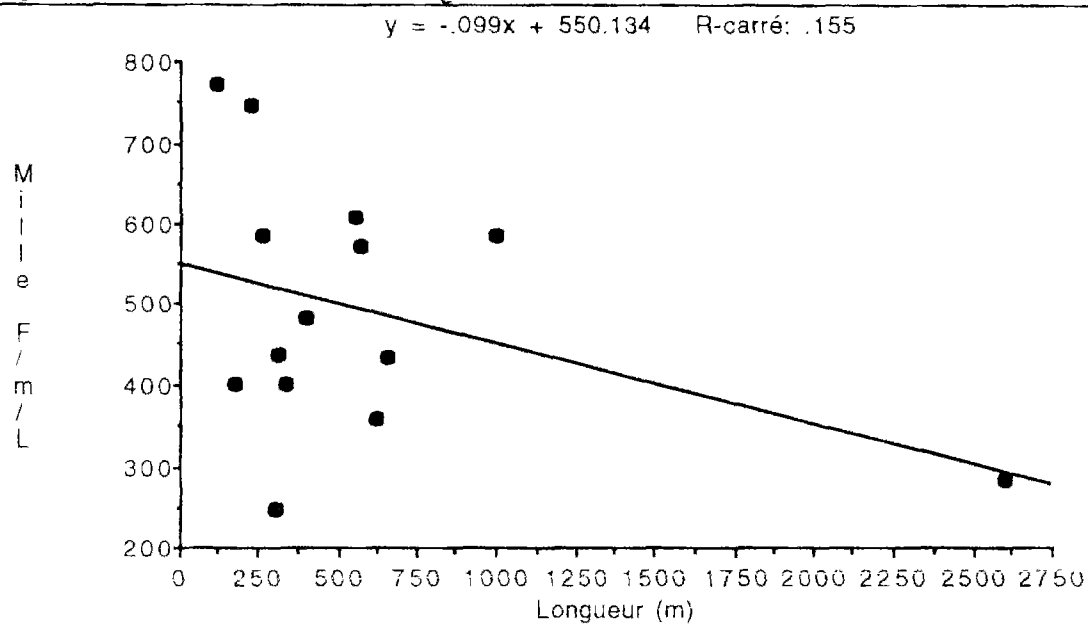
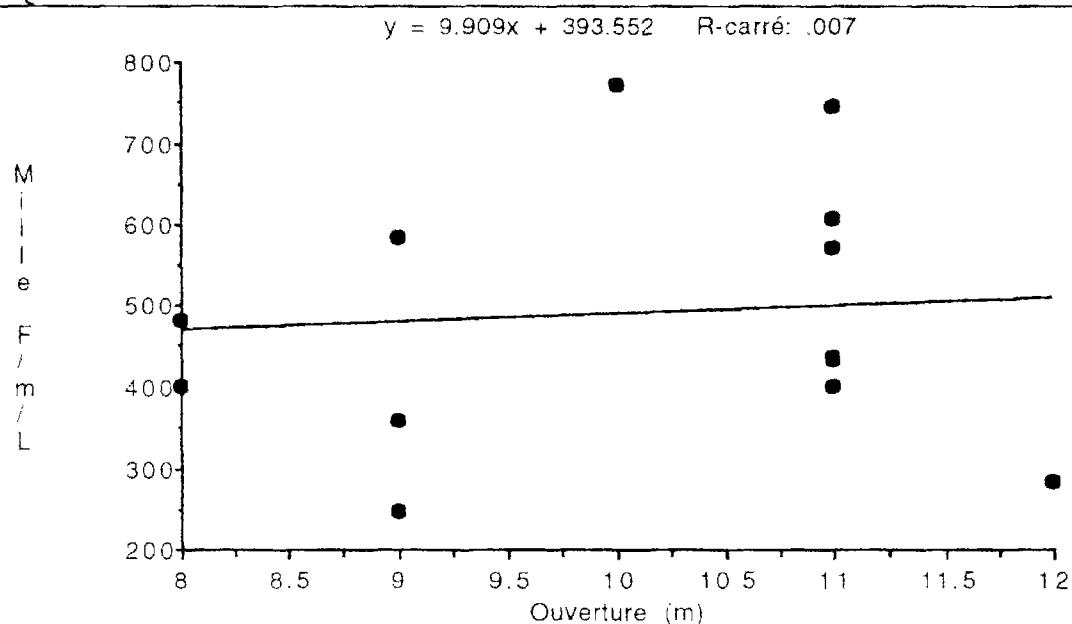


Fig V.D-2- Coûts en fonction de l'ouverture m)



ANNEXES AU CHAPITRE V

Annexe V D- Coûts des tunnels de métro régional -Exécution en souterrain - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fig V.D-3- Coûts en fonction de profondeur en m)

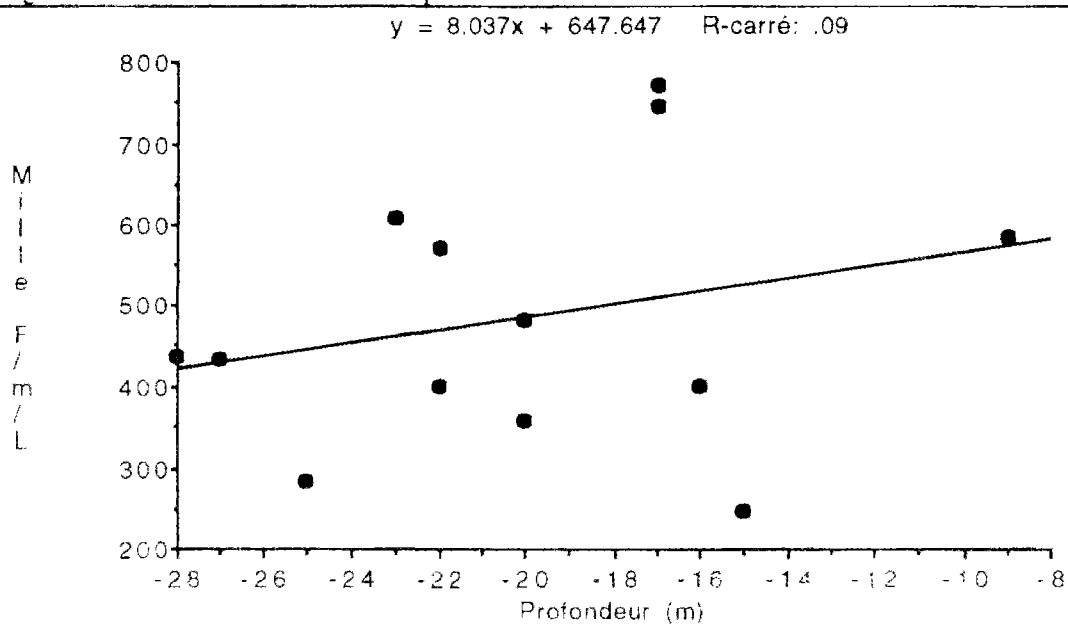
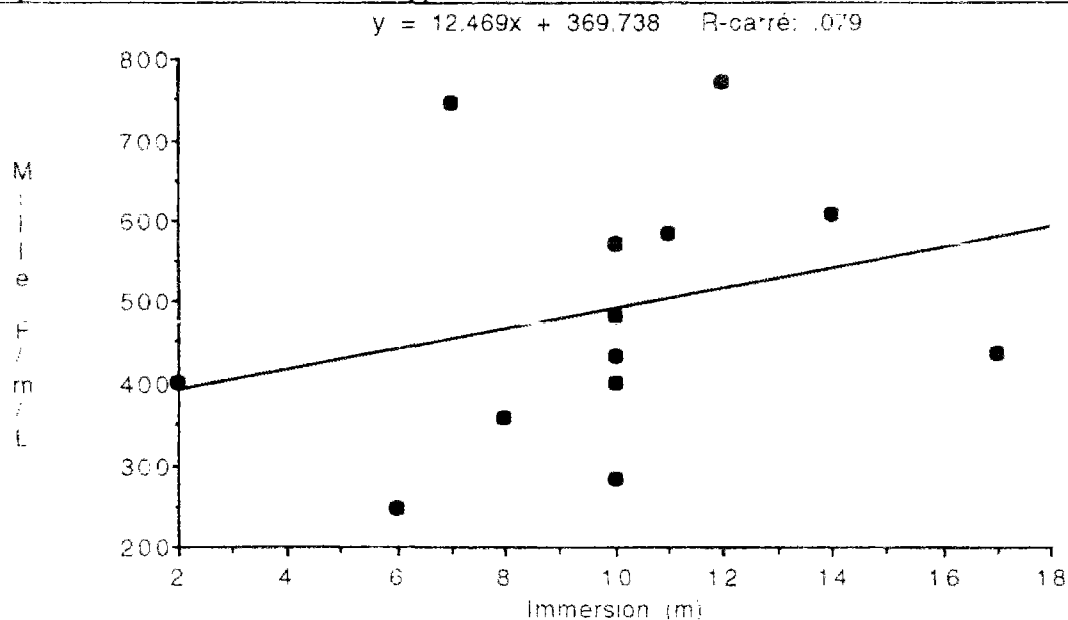


Fig V.D-4- Coûts en fonction de la nappe



ANNEXES AU CHAPITRE V

Annexe V D- Coûts des tunnels de métro régional -Exécution en souterrain - Résultats d'analyse des facteurs pris isolément

Fig V.D-5- Coûts en fonction des conditions géologiques

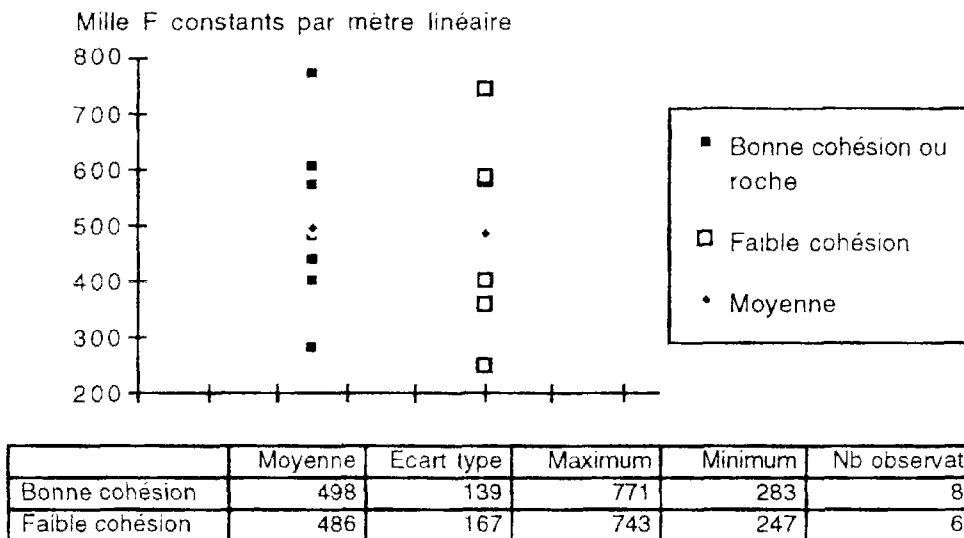
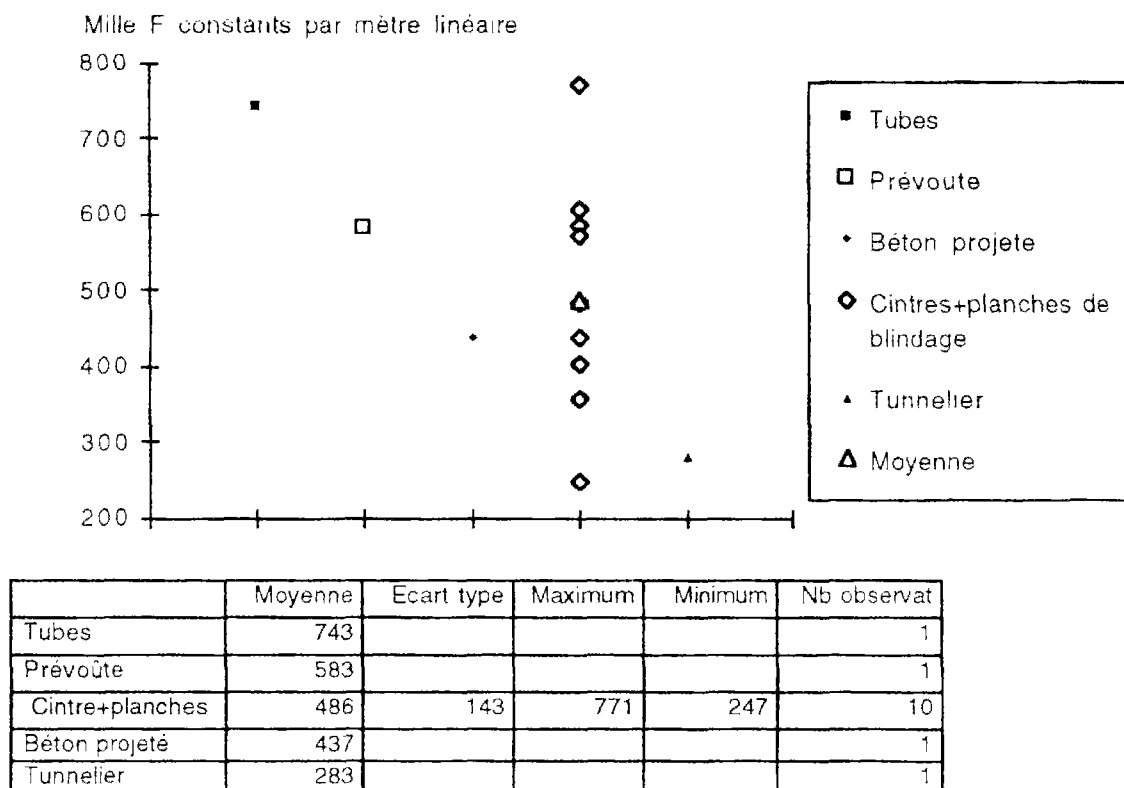


Fig V.D-6- Coûts en fonction de méthodes de soutènement



ANNEXES AU CHAPITRE V

Annexe V.E (a) - Coûts des tunnels du métro régional - Exécution en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple (12 variables explicatives, 14 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 12 Independents

Count	14
Num. Missing	0
R	,997
R Squared	,995
Adjusted R Squared	,932
RMS Residual	41,076

ANOVA Table

Mille F vs. 12 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	12	320064,760	26672,063	15,808	,1943
Residual	1	1687,240	1687,240		
Total	13	321752,000			

Regression Coefficients

Mille F vs. 12 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	747,605	518,400	747,605	1,442	,3860
Lg	1,117	,342	3,518	3,265	,1892
An	-2,075	7,957	-,053	-,261	,8376
Ov	66,650	24,347	,572	2,738	,2230
St	-6,491	3,967	-,470	-1,636	,3492
Vs	9,838	6,182	,543	1,591	,3572
Pf	-50,820	15,183	-1,898	-3,347	,1848
Hi	16,666	11,462	,376	1,454	,3835
Gb	199,082	143,381	,650	1,388	,3974
Mp	-315,976	207,244	-,999	-1,525	,3696
Mf	-2196,319	686,590	-3,731	-3,199	,1929
Pr	-815,863	253,682	-1,386	-3,216	,1919
Tm	162,656	181,018	,440	,899	,5340

ANNEXES AU CHAPITRE V

Annexe V.E (b) - Coûts des tunnels du métro régional - Exécution en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple
(9 variables explicatives, 14 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 9 Independents

Count	14
Num. Missing	0
R	,990
R Squared	,980
Adjusted R Squared	,936
RMS Residual	39,879

ANOVA Table

Mille F vs. 9 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	9	315390,566	35043,396	22,035	,0046
Residual	4	6361,434	1590,358		
Total	13	321752,000			

Regression Coefficients

Mille F vs. 9 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	780,546	269,862	780,546	2,892	,0445
Lg	1,349	,201	4,250	6,709	,0026
Ov	87,876	15,710	,754	5,594	,0050
St	-6,998	2,808	-,507	-2,492	,0673
Vs	11,589	4,316	,640	2,685	,0549
Pf	-63,172	7,926	-2,359	-7,970	,0013
Gb	303,456	66,532	,991	4,561	,0103
Mp	-502,448	69,932	-1,588	-7,185	,0020
Mf	-2759,577	360,204	-4,688	-7,661	,0016
Pr	-964,551	154,499	-1,639	-6,243	,0034

ANNEXES AU CHAPITRE V

Annexe V.E (c) - Coûts des tunnels du métro régional - Exécution en souterrain - Résultats d'analyse de la régression multiple
(3 variables explicatives, 13 observations)

Multiple - Y : Mille/m/L Trois X variables

Degré de Lib.:	R-carré:	Erreur Type:	Coef. Var.:
12	.746	84.813	17.902

Tableau de l'Analyse de Variance

Source	Degré de Lib.:	Somme Carrés:	Moyenne Carrés:	F Fisher-Sne.:
RÉGRESSION	3	189705.526	63235.175	8.791
RÉSIDU	9	64738.782	7193.198	.005 < p ≤ .01
TOTAL	12	254444.308		

Tableau de Coefficient Béta

Parametre:	Valeur:	Erreur Type:	Valeur-T.	F Partiel:
INTERVALE	-225.797	219.524	-1.029	
Section te(m)	7.508	2.205	3.404	11.59
Profondeur(m)	-8.838	4.401	-2.008	4.032
Immersion(m)	16.629	7.714	2.156	4.648

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VI.A (a) - Ensemble des coûts des tunnels - Exécution en souterrain - Métros urbains et régionaux - Résultats d'analyse de la régression multiple (22 variables explicatives, 45 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 22 Independents

Count	45
Num. Missing	0
R	,971
R Squared	,942
Adjusted R Squared	,885
RMS Residual	56,521

ANOVA Table

Mille F vs. 22 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	22	1146987,826	52135,810	16,320	<,0001
Residual	22	70280,619	3194,574		
Total	44	1217268,444			

Regression Coefficients

Mille F vs. 22 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff	t-Value	P-Value
Intercept	1070,201	460,215	1070,201	2,325	,0297
Lg	5,541E-3	,020	,025	,279	,7828
An	-9,685	4,454	-,239	-2,175	,0407
Ov	-17,614	9,516	-,171	-1,851	,0776
Vs	3,252	2,701	,193	1,204	,2414
Pf	-6,456	3,452	-,196	-1,870	,0748
Hi	5,094	2,944	,189	1,730	,0976
Cv	-117,721	92,758	-,354	-1,269	,2177
Pu	-164,180	94,572	-,489	-1,736	,0965
Pa	-15,389	42,310	-,047	-,364	,7195
Gb	-15,099	61,090	-,043	-,247	,8071
Gf	-18,537	64,980	-,050	-,285	,7781
Mp	21,337	57,211	,061	,373	,7128
Mf	78,032	72,498	,161	1,076	,2934
Tm	-26,541	75,621	-,051	-,351	,7289
Ci	100,210	52,415	,276	1,912	,0690
Pr	111,359	53,662	,193	2,075	,0499
Pt	-24,573	52,584	-,060	-,467	,6449
Ts	-27,359	44,070	-,083	-,621	,5411
Tf	112,157	53,779	,214	2,085	,0488
Tg	-7,946	63,590	-,015	-,125	,9017
Sr	172,611	67,088	,476	2,573	,0174
St	1,774	1,876	,220	,945	,3548

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VI.A (b) - Ensemble des coûts des tunnels - Exécution en souterrain - Métros urbains et régionaux - Résultats d'analyse de la régression multiple (9 variables explicatives, 45 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 9 Independents

Count	45
Num. Missing	0
R	,961
R Squared	,923
Adjusted R Squared	,903
RMS Residual	51.768

ANOVA Table

Mille F vs. 9 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	9	1123470,122	124830,014	46,579	<,0001
Residual	35	93798,322	2679,952		
Total	44	1217268,444			

Regression Coefficients

Mille F vs. 9 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	559,790	236,426	559,790	2,368	,0236
An	-5,303	2,584	-,131	-2,053	,0476
Vs	4,685	1,526	,279	3,070	,0041
Pf	-7,207	2,413	-,219	-2,987	,0051
Hi	5,322	1,730	,198	3,077	,0040
Pu	-46,114	22,953	-,137	-2,009	,0523
Pr	80,293	36,630	,139	2,192	,0351
Tf	106,118	29,609	,203	3,584	,0010
Sr	196,138	32,300	,541	6,072	<,0001
Ci	44,389	23,697	,122	1,873	,0694

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VI.A (c) - Ensemble des coûts des tunnels - Exécution en souterrain - Métros urbains et régionaux - Résultats d'analyse de la régression multiple (3 variables explicatives, 43 observations)

Multiple - Y : Mille/m/L Trois X variables

Degré de Lib.:	R-carré:	Erreur Type:	Coef. Var.:
42	.883	59.829	23.972

Tableau de l'Analyse de Variance

Source	Degré de Lib.:	Somme Carrés:	Moyenne Carrés:	F Fisher-Sne.:
RÉGRESSION	3	1055225.964	351741.988	98.266
RÉSIDU	39	139600.501	3579.5	p ≤ .0001
TOTAL	42	1194826.465		

Tableau de Coefficient Béta

Parametre:	Valeur:	Erreur Type:	Valeur-T:	F Partiel:
INTERVALE	49.382	25.935	1.904	
Volume(m3)	7.569	1.305	5.798	33.622
Périphérie	-40.369	22.029	-1.833	3.358
PER	208.028	32.36	6.428	41.325

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VI.B (a) - Ensemble des coûts des tunnels - Exécution en souterrain - Métros urbains et régionaux - Résultats d'analyse de la régression multiple - Avec les niveaux de technicité (17 variables explicatives, 45 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 17 Independents

Count	45
Num. Missing	0
R	,957
R Squared	,916
Adjusted R Squared	,863
RMS Residual	61,626

ANOVA Table

Mille F vs. 17 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	17	1114728,873	65572,287	17,266	<.0001
Residual	27	102539,572	3797,762		
Total	44	1217268,444			

Regression Coefficients

Mille F vs. 17 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	273,955	499,848	273,955	,548	,5881
Lg	,026	,020	,118	1,327	,1958
An	-2,011	4,806	-,050	-,418	,6789
Ov	-10,386	10,088	-,101	-1,030	,3124
Vs	5,371	2,733	,301	1,856	,0744
Pf	-5,918	3,178	-,180	-1,862	,0735
Il	5,735	2,827	,213	2,028	,0525
Cv	-54,879	78,867	-,185	-,696	,4925
Pu	-63,780	82,718	-,190	-,771	,4474
Pa	-1,252	42,971	-3,797E-3	-,029	,9770
Gb	-4,887	59,047	-,014	-,083	,9347
Gf	-35,417	62,356	-,095	-,568	,5747
Ci	37,104	38,345	,102	,968	,3418
Pr	66,270	49,142	,115	1,349	,1887
Sr	175,271	63,863	,483	2,744	,0106
St	1,651	1,817	,205	,909	,3716
3	65,840	44,936	,181	1,465	,1544
2	5,992	32,192	,012	,186	,8537

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VI.B (b) - Ensemble des coûts des tunnels - Exécution en souterrain - Métros urbains et régionaux - Résultats d'analyse de la régression multiple - Avec les niveaux de technicité (5 variables explicatives, 45 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 5 Independents

Count	45
Num. Missing	0
R	,946
R Squared	,895
Adjusted R Squared	,881
RMS Residual	57,358

ANOVA Table

Mille F vs. 5 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	5	1088962,841	217792,568	66,201	<,0001
Residual	39	128305,603	3289,887		
Total	44	1217268,444			

Regression Coefficients

Mille F vs. 5 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	81,283	47,437	81,283	1,714	,0946
Vs	6,042	1,452	,359	4,160	,0002
Pf	-5,880	2,248	-,179	-2,616	,0126
Hi	5,681	1,784	,211	3,184	,0029
Sr	188,650	31,654	,520	5,960	<,0001
3	84,334	28,318	,232	2,978	,0050

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VI.B (c) - Coûts des tunnels - Métros urbains - Exécution en souterrain - Métros urbains - Résultats d'analyse de la régression multiple - Avec les niveaux de technicité
(5 variables explicatives, 29 observations)

Multiple - Y : Mille/m/L Cinq X variables

Degré de Lib.:	R-carré:	Erreur Type:	Coef. Var.:
28	.802	23.597	14.483

Tableau de l'Analyse de Variance

Source	Degré de Lib.:	Somme Carrés:	Moyenne Carrés:	F Fisher-Sne.:
RÉGRESSION	5	51845.445	10369.089	18.623
RÉSIDU	23	12806.417	556.801	p ≤ .0001
TOTAL	28	64651.862		

Tableau de Coefficient Béta

Paramètre:	Valeur:	Erreur Type:	Valeur-T:	F Partiel:
INTERVALE	256.707	31.857	8.058	
Section te(m)	-4.176	.772	-5.411	29.275
Volume(m3)	8.396	1.08	7.772	60.41
Périphérie	-53.596	10.778	-4.973	24.729
3	59.985	15.39	3.898	15.192
2	29.637	12.288	2.412	5.817

Annexe VI.B (c) Un supplément de l'équation précédente en ajoutant la variable *année* dont la valeur t n'est pas élevée

Multiple - Y : Mille/m/L Six X variables

Degré de Lib.:	R-carré:	Erreur Type:	Coef. Var.:
28	.813	23.42	14.374

Tableau de l'Analyse de Variance

Source	Degré de Lib.:	Somme Carrés:	Moyenne Carrés:	F Fisher-Sne.:
RÉGRESSION	6	52584.95	8764.158	15.979
RÉSIDU	22	12066.912	548.496	p ≤ .0001
TOTAL	28	64651.862		

Tableau de Coefficient Beta

Paramètre:	Valeur:	Erreur Type:	Valeur-T:	F Partiel:
INTERVALE	433.672	155.652	2.786	
Années	-1.935	1.667	-1.161	1.348
Section te(m)	-4.372	.784	-5.574	31.065
Volume(m3)	8.007	1.109	7.275	52.922
Périphérie	-52.033	10.781	-4.826	23.292
3	51.242	17.03	3.009	9.054
2	25.587	12.685	2.017	4.069

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VI.C (a) - Ensemble des coûts de tunnels de métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain et en tranchée couverte - Résultats d'analyse de la régression multiple
(34 variables explicatives, 89 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 34 Independents

Count	89
Num. Missing	0
R	.935
R Squared	.874
Adjusted R Squared	.794
RMS Residual	64,753

ANOVA Table

Mille F vs. 34 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	34	1564659,039	46019,384	10,975	<,0001
Residual	54	226419,522	4192,954		
Total	88	1791078,562			

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VI.C (a) - Ensemble des coûts de tunnels de métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain et en tranchée couverte - Résultats d'analyse de la régression multiple
(34 variables explicatives, 89 observations) (la suite)

Regression Coefficients Mille F vs. 34 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	931,227	328,661	931,227	2,833	,0065
Lg	-4,287E-3	,014	-,022	-,297	,7679
An	-4,990	3,256	-,136	-1,533	,1312
Ov	-,390	8,367	-4,092E-3	-,047	,9630
St	,137	,571	,029	,239	,8119
Vs	4,259	2,145	,268	1,985	,0522
Pf	-6,577	3,290	-,260	-1,999	,0506
Hi	2,283	2,817	,096	,810	,4212
Cv	-6,029	50,976	-,021	-,118	,9063
Pu	-14,235	51,738	-,050	-,275	,7843
Su	-253,857	43,929	-,859	-5,779	<.0001
Tc	-185,238	120,888	-,653	-1,532	,1313
Pa	-46,584	35,319	-,163	-1,319	,1928
Gb	-75,701	31,224	-,266	-2,424	,0187
Gf	-74,557	34,153	-,242	-2,183	,0334
Mp	26,799	49,359	,089	,543	,5894
Mf	-24,328	60,223	-,043	-,404	,6878
Tm	70,592	61,618	,125	1,146	,2570
Co	-76,270	40,709	-,263	-1,874	,0664
Ss	21,005	73,147	,027	,287	,7751
Bt	110,192	43,569	,379	2,529	,0144
Ci	-29,946	41,898	-,101	-,715	,4779
Pr	21,988	53,189	,032	,413	,6810
Pt	-33,632	53,805	-,117	-,625	,5346
Ts	2,485	45,369	7,669E-3	,055	,9565
Tf	88,564	57,624	,144	1,537	,1301
Tg	15,023	66,191	,024	,227	,8213
Bl	-73,818	80,460	-,228	-,917	,3630
Pm	-137,137	90,515	-,305	-1,515	,1356
Pp	-81,003	87,867	-,154	-,922	,3607
Ft	16,281	133,187	,012	,122	,9032
Pc	-174,480	125,686	-,130	-1,388	,1708
Ir	1,100	45,264	2,738E-3	,024	,9807
Po	45,279	43,381	,080	1,044	,3012
Ri	13,967	56,116	,018	,249	,8044

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VI.C (b) - Ensemble des coûts de tunnels de métros urbains et régionaux - Exécution en souterrain et en tranchée couverte - Résultats d'analyse de la régression multiplée
(13 variables explicatives - 89 observations)

Regression Summary

Mille F vs. 13 Independents

Count	89
Num. Missing	0
R	.924
R Squared	.853
Adjusted R Squared	.828
RMS Residual	59,162

ANOVA Table

Mille F vs. 13 Independents

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Regression	13	1528571.032	117582.387	33.594	<.0001
Residual	75	262507.530	3500.100		
Total	88	1791078.562			

Regression Coefficients

Mille F vs. 13 Independents

	Coefficient	Std. Error	Std. Coeff.	t-Value	P-Value
Intercept	1167.720	195.352	1167.720	5.978	<.0001
An	-7.240	2.138	-.197	-3.386	.0011
Vs	4.728	1.340	.297	3.528	.0007
Pf	-7.783	1.943	-.308	-4.006	.0001
Su	-275.392	28.017	-.932	-9.830	<.0001
Tc	-260.349	51.146	-.919	-5.100	<.0001
Pa	-74.202	20.069	-.260	-3.697	.0004
Gb	-65.522	23.538	-.231	-2.784	.0068
Gf	-53.082	23.610	-.172	-2.248	.0275
Co	-69.189	29.947	-.238	-2.310	.0236
Bt	91.396	27.428	.316	3.350	.0013
Pt	-57.938	24.225	-.201	-2.388	.0195
Tf	95.989	32.310	.156	2.971	.0040
Pm	-56.891	26.490	-.127	-2.148	.0350

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VLD - 89 observations et ses variables explicatives (tableau)

Mille F	Lg	An	Ov	St	Vs	Pf	Hi	Cv	Pu	Su	Ic	Sr	Pa	Gb	Gf	Mp	Mf	Tm	Co	Ss	Bt	Ci	Pr	Pl	Ts	Tf	Tg	Bl	Pm	Pp	Ft	Pc	Jr	Po	
253	334	79	9	58	36	10	0	0	1	1	0	0	7	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
256	334	77	7	67	24	14	5	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
259	324	75	10	54	15	18	18	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
215	1173	85	7	44	14	10	19	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
214	878	85	7	44	14	15	15	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
213	741	80	0	62	26	0	3	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
217	826	85	7	44	13	14	12	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
206	958	75	7	53	36	14	3	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
202	1026	85	7	44	14	0	15	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	72	82	10	70	32	11	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
193	190	83	7	62	21	11	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
197	1016	80	7	58	22	13	3	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
184	1522	85	7	44	14	16	18	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
175	1240	82	11	66	22	15	15	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
169	150	82	9	56	22	11	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
167	1400	82	9	62	21	15	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
158	430	75	11	85	24	16	12	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
156	1133	85	7	44	13	17	11	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
154	3534	75	10	52	11	21	15	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
144	75	84	7	57	26	12	10	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	171	84	7	55	23	13	10	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
139	1224	89	7	50	9	18	18	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
131	2168	85	10	54	12	20	10	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
131	463	82	7	67	21	17	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	283	86	8	48	13	15	13	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
116	1008	85	8	53	13	16	10	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
103	1307	85	8	50	12	18	14	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
101	3263	85	7	45	13	13	8	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
94	357	85	8	52	13	18	13	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
93	768	85	7	44	13	15	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
91	261	86	8	48	12	30	25	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
87	1190	84	8	48	12	19	13	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
368	560	78	8	81	13	8	7	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
353	194	79	9	148	30	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VLD - 89 observations et ses variables explicatives (tableau: la suite)

Mille F	Lq	An	Ov	St	Vs	Pl	Hi	Cv	Pu	Su	Tc	Sr	Pa	Gb	Gf	Mp	Mf	Tm	Co	Ss	Bt	Ci	Pr	Pt	Ts	Tf	Tg	Bl	Pm	Pp	Ft	Pc	Ir	Po		
362	700	78	8	63	12	6	5	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
332	254	78	8	45	12	6	6	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
307	350	82	8	72	14	7	4	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
278	235	80	9	95	13	9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
267	108	85	6	56	9	9	6	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
266	635	80	8	81	15	8	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
262	207	84	11	154	31	6	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
257	1583	82	8	106	14	10	8	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
251	727	75	8	100	16	6	2	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
239	1060	82	8	60	14	6	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
238	380	82	8	70	14	7	5	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
222	279	84	7	97	14	9	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
218	164	75	7	97	22	9	4	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
213	313	79	7	67	24	6	2	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
210	78	79	10	98	20	5	2	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
208	108	84	8	110	23	6	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
205	548	75	7	125	36	7	3	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
203	119	75	7	168	35	12	3	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
184	3833	82	8	64	14	7	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
184	114	85	9	130	22	11	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
183	449	79	7	91	16	9	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
182	103	75	7	150	24	8	4	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
177	120	85	7	80	20	7	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
176	262	82	7	113	21	8	2	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
165	81	85	8	104	18	10	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
159	2520	85	6	63	9	9	2	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
152	321	85	7	100	16	10	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
147	429	84	8	89	13	9	6	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
144	414	82	7	137	17	11	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
144	202	85	6	56	9	8	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
133	332	85	6	54	9	9	7	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
130	1366	85	7	98	18	7	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
126	533	82	7	112	17	10	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

ANNEXES AU CHAPITRE VI

Annexe VI.D 89 observations et ses variables explicatives (tableau fin)

Mille F	Lq	An	Ov	St	Vs	Pf	Hf	Cv	Fu	Su	Tc	Sr	Pa	Gb	Gf	Mp	Mt	Im	Co	Ss	Bt	Ci	Pr	Ts	Tf	Ig	Bl	Pm	Pp	Ft	Pc	Ir	Po	Ri
122	618	82	7	114	18	12	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
114	687	82	7	94	18	11	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
111	867	85	6	42	9	6	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
130	161	84	7	160	29	8	7	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
104	358	85	7	42	9	6	7	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
162	485	85	7	68	16	7	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
81	98	80	7	67	14	10	4	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
79	72	89	7	79	14	9	5	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
771	118	77	10	130	54	17	12	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	230	77	11	98	38	17	7	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
476	550	77	11	90	32	23	14	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
505	251	81	9	93	31	9	11	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
583	622	81	9	93	31	9	11	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
570	557	77	11	86	32	27	10	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
442	409	77	9	89	38	20	10	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
437	315	77	11	94	32	28	17	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
437	653	77	11	96	32	27	10	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
401	177	77	8	90	30	16	2	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
401	338	77	11	96	42	22	10	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
355	675	88	9	85	26	20	8	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
223	2053	77	13	82	16	25	10	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
247	368	68	6	85	20	15	6	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Base:

Facteurs communs à tous les types d'ouvrages:

- An: Année de construction.
- Lq: Longueur (m).
- Pa: Paris;
- Ov: Ouverture intérieure (m).
- St: Section transversale (m²).
- Vs: Volume de structure (m³/ml).
- Pf: Profondeur du talus rapport au sol naturel (m).
- Hf: Hauteur immergée (m).
- Cv: Centre ville.
- Po: Périphérie urbaine.
- Gb: Géologie (bonne).
- Gf: Géologie (maigre).

Facteurs spécifiques aux tranchées couvertes:

- Tc: Tranchée couverte;
- Cv: Ciel ouvert;
- Bl: Bétonnières;
- Pm: Paroi moulée;
- Pf: Paroi préfabriquée;
- lx: Paleyfranche;
- Ss: Sans soutènement;
- Rt: Butons;
- Ir: Injection radier;
- Po: Pompes;
- Ri: Rideau d'injection périphérique;
- Ft: Foutille tabulée

Facteurs spécifiques aux véhicules:

- Sr: Souterrain: mètres urbains;
- Mp: Machine à attaque ponctuelle;
- Mf: Machine à force en pleine section;
- Im: Terrassement manuel;
- Ci: Citrus: planches de blindage;
- Pi: Prévoité;
- Pt: Pas de traitement;
- Fs: Traitement depuis la surface;
- Tf: Traitement à partir du front de taille;
- Ig: Traitement à partir d'une gabarie de pilote;
- St: Souterrain: mètres région.

ANNEXES AU CHAPITRE VII

Annexe VII. A- Ensemble des tunnels de métros urbains et régionaux

Exécution en souterrain et en tranchée couverte - Répartition des coûts des équipements

(En mille F constants par mètre linéaire; Valeurs triées par années)

Année	Total	Locali	STN	mètre	Voie	Vcé	Cfo	Cfa	Année	Total	Locali	STN	mètre	Voie	Vcé	Cfo	Cfa
1975	47,8	Paris	STN	958	12,9	1,4	16,7	16,7	1982	54,6	paris	TC	533	13,1	1,6	20,1	19,8
1975	53,3	Provin	STN	3534	20,8	1,8	15,9	14,8	1982	42,9	Paris	TC	618	10,7	2,4	12,1	17,7
1975	53,2	Provin	STN	470	20,6	1,9	15,8	14,9	1982	53,2	paris	TC	414	12,8	1,6	19,6	19,2
1975	77,2	provin	STN	324	30,0	2,8	22,9	21,7	1982	53,0	paris	TC	687	12,8	1,4	19,5	19,3
1975	47,9	paris	TC	119	14,1	0,0	16,9	16,9	1982	52,5	paris	TC	262	12,7	1,3	19,6	19,0
1975	48,1	paris	TC	548	12,8	1,2	17,1	17,1	1984	70,9	Paris	STN	75	19,7	0,0	27,6	23,6
1975	46,8	paris	TC	164	12,2	2,0	16,3	16,3	1984	70,5	Paris	STN	171	18,9	0,9	27,5	23,2
1975	45,5	paris	TC	103	13,0	0,0	16,2	16,2	1984	70,7	paris	TC	279	19,0	0,5	28,0	23,2
1975	126,8	provin	TC	727	50,5	1,7	38,6	36,0	1984	71,0	paris	TC	207	19,2	0,7	27,7	23,4
1977	84,6	Paris	RER	400	16,5	10,7	35,1	22,2	1984	71,9	paris	TC	168	19,3	0,9	28,0	23,7
1977	84,0	Paris	RER	338	16,1	11,0	34,8	22,1	1984	71,1	paris	TC	161	19,1	0,9	27,3	23,7
1977	84,1	Paris	RER	2603	16,3	10,8	34,9	22,1	1984	33,9	Provin	STN	1180	24,9	1,4	7,5	0,0
1977	95,2	Paris	RER	653	18,4	12,3	39,5	25,0	1984	31,5	provin	TC	429	26,3	0,6	4,7	0,0
1977	84,9	Paris	RER	567	16,7	10,6	35,4	22,2	1985	33,4	Provin	STN	2168	24,0	1,9	7,4	0,0
1977	84,8	Paris	RER	230	16,2	11,2	34,9	22,4	1985	29,1	Provin	STN	1098	25,3	1,3	2,5	0,0
1977	63,1	Paris	RER	177	14,6	3,2	29,1	16,2	1985	38,1	Provin	STN	1522	21,8	0,9	11,1	4,3
1977	46,1	Paris	RER	118	9,7	2,4	21,8	12,1	1985	38,3	Provin	STN	1173	21,8	1,4	10,9	4,2
1977	62,4	Paris	RER	550	14,0	2,6	29,1	16,6	1985	38,6	Provin	STN	878	21,6	1,5	11,1	4,4
1977	61,8	Paris	RER	315	13,6	2,7	29,1	16,4	1985	38,3	Provin	STN	1026	21,7	1,0	11,1	4,4
1977	69,2	Paris	STN	374	21,0	1,6	20,2	26,4	1985	48,1	Provin	STN	768	28,1	0,9	9,4	9,7
1978	89,0	provin	TC	560	53,1	1,0	5,1	29,8	1985	48,4	Provin	STN	3263	28,1	1,0	9,5	9,8
1978	90,0	provin	TC	700	53,3	1,6	4,9	30,1	1985	48,5	Provin	STN	1133	28,1	1,2	9,4	9,8
1978	90,8	provin	TC	254	54,5	1,1	4,5	30,7	1985	48,7	Provin	STN	826	28,1	1,5	9,4	9,7
1979	36,8	Paris	STN	394	11,7	1,8	12,9	10,4	1985	47,8	provin	TC	262	28,0	0,5	9,7	9,7
1979	37,1	paris	TC	449	11,3	2,2	12,9	10,8	1985	48,2	provin	TC	108	28,4	0,0	9,9	9,9
1979	37,4	paris	TC	194	11,2	2,5	12,5	11,2	1985	46,2	provin	TC	332	27,6	0,0	9,1	9,5
1979	37,1	paris	TC	78	12,4	3,1	12,4	9,3	1985	49,6	provin	TC	358	28,1	2,6	9,2	9,6
1979	37,0	paris	TC	313	11,6	2,3	12,3	10,8	1985	46,9	provin	TC	867	27,6	0,6	9,2	9,5
1980	104,7	provin	TC	635	37,9	0,0	12,9	53,9	1985	73,8	paris	TC	114	19,4	2,4	24,2	27,8
1980	103,7	provin	TC	235	38,0	0,0	12,7	53,0	1985	73,9	paris	TC	321	19,8	2,1	24,5	27,5
1980	64,2	Paris	STN	244	19,6	0,9	20,5	23,2	1985	73,2	paris	TC	81	20,4	1,7	23,8	27,2
1980	63,0	Paris	STN	1016	18,2	1,1	20,1	23,6	1985	74,1	paris	TC	1366	20,0	2,3	24,3	27,4
1981	95,9	Paris	RER	992	10,2	4,7	48,9	32,0	1985	73,6	paris	TC	120	19,6	2,3	24,2	27,6
1981	95,4	Paris	RER	264	10,4	4,4	48,8	31,8	1985	33,5	paris	TC	485	16,3	2,3	8,9	6,0
1982	59,3	Provin	STN	1400	34,8	5,6	2,5	16,4	1985	38,7	paris	TC	2520	22,4	0,7	11,3	4,4
1982	35,4	Provin	STN	2500	18,7	1,1	2,2	13,4	1985	36,9	Provin	STN	1307	22,1	2,0	12,8	0,0
1982	57,2	provin	TC	1660	32,0	0,9	4,3	20,0	1986	37,6	Provin	STN	261	26,6	1,8	9,2	0,0
1982	55,5	provin	TC	350	32,7	5,5	2,5	14,9	1986	38,3	Provin	STN	357	26,9	2,0	9,4	0,0
1982	32,5	provin	TC	1583	17,1	1,0	2,0	12,3	1986	38,0	Provin	STN	283	27,0	1,7	9,3	0,0
1982	33,1	provin	TC	380	17,8	1,0	1,9	12,5	1988	32,9	Paris	RER	625	6,8	4,1	7,0	15,0
1982	53,9	provin	TC	3833	36,5	0,7	2,3	14,4	1988	37,5	Paris	RER	308	8,7	4,3	7,9	16,6
1982	42,7	Paris	STN	159	10,4	2,1	12,5	17,7	1989	13,0	Provin	STN	1224	8,6	0,0	3,5	0,9
1982	45,9	Paris	STN	72	11,5	2,3	13,8	18,3	1989	16,5	provin	TC	98	8,8	4,4	3,3	0,0
1982	43,0	Paris	STN	463	10,7	2,5	12,2	17,6	1989	16,5	provin	TC	72	9,0	4,5	3,0	0,0
1982	42,8	Paris	STN	190	10,5	2,6	12,2	17,5									

Vce= Ventilation, climatisation, épuisements; Cfo= Courants forts; Cfa= Courants faibles.

STN= Tunnel exécuté en souterrain; TC= tunnel exécuté en tranchée couverte.

ANNEXES AU CHAPITRE VII

Annexe VII. B - Ensemble des coûts des tunnels de métros urbains et régionaux -Exécution en souterrain et en tranchée couverte - Coûts des équipements - Résultats d'analyse des facteurs

Multiple - Y : Coûts Quatre X variables

Degré de Lib.: R-carré: Erreur Type: Coef. Var.:

88	.225	19.82	35.6
----	------	-------	------

Tableau de l'Analyse de Variance

Source	Degré de Lib.:	Somme Carrés:	Moyenne Carrés:	F Fisher-Sne.:
RÉGRESSION	4	9604.79	2401.197	6.112
RÉSIDU	84	32998.761	392.842	.0001 < p ≤ .005
TOTAL	88	42603.551		

Tableau de Coefficient Beta

Paramètre:	Valeur:	Erreur Type:	Valeur-T:	F Partiel:
INTERVALE	4985.539	1144.251	4.357	
Années	-2.487	.577	-4.308	18.562
Localité	-1.609	4.829	-.333	.111
Longueur (m)	-.003	.003	-.862	.743
Technique	1.197	2.992	.4	.16